Digitized by Google

201
36 G
12

Digitized by Google

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE
III

Digitized by Google

CET OUVRAGE SE TROUVE AUSSI

A GENÈVE

CHEZ JOEL CHERBULIEZ, LIBRAIRE

Rue de la Cité

Paris. — Imprimerie de P.-A. BOURDIER et Cie, rue Mazarine, 30.

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

PAR

A. DE LA RIVE

PROFESSEUR ÉMÉRITE DE L'ACADÉMIE DE GENÈVE, DOCTEUR HONORAIRE DE L'UNIVERSITÉ DE PRAGUE
CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE DE PARIS,
ASSOCIÉ ÉTRANGER DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE LONDRES;
DES ACADÉMIES DE BERLIN, DE TURIN, DE BRUXELLES ET DE NAPLES;
MEMBRE DES SOCIÉTÉS DES ARTS ET DES SCIENCES NATURELLES DE GENÈVE, ETC.

Avec figures intercalées dans le texte

TOME TROISIÈME

A PARIS
CHEZ J.-B. BAILLIÈRE ET FILS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE IMPÉRIALE DE MÉDECINE
RUE HAUTEFEUILLE, 19
LONDRES, HIPP. BAILLIÈRE, 219, REGENT STREET
NEW-YORK, HIPP. BAILLIÈRE, 290, BROADWAY
MADRID, C. BAILLY-BAILLIÈRE, CALLE DEL PRINCIPE, 11

1858

Digitized by Google

AVERTISSEMENT

J'ai besoin de justifier le retard qu'a éprouvé la publication de ce troisième et dernier volume du *Traité d'Électricité théorique et appliquée;* je le ferai en peu de mots.

Quelque vaste que soit devenu le domaine de l'électricité, il est facile, tant qu'il ne s'agit que de la théorie, à celui qui s'est voué à l'étude de cette branche de la science, de se tenir au courant de tout ce qui s'y rapporte. Mais si de la théorie on passe à l'application, d'autres connaissances en assez grand nombre deviennent nécessaires; les parties qui sont traitées dans ce troisième volume en sont la preuve. Ainsi les applications physiques reposent, pour le plus grand nombre, sur des notions délicates de mécanique pratique; les applications chimiques exigent des connaissances métallurgiques assez spéciales; enfin les applications thérapeutiques demandent une appréciation raisonnée des questions physiologiques et médicales. Cette simple énumération suffit pour faire comprendre les difficultés que j'ai rencontrées dans la composition de ce troisième volume; on concevra donc sans peine que la publication en ait été retardée par le désir que j'ai eu de m'éclairer auprès des personnes qui se sont occupées des sujets que j'étais appelé à traiter, soit en consultant leurs ouvrages, soit en conversant avec elles. C'est surtout en ce

qui concerne les applications thérapeutiques, que cette double ressource m'a été précieuse; et à cet égard il m'est permis de mentionner comme m'ayant été spécialement utiles l'ouvrage de M. Duchenne de Boulogne, *De l'Électrisation localisée*, et le *Traité des applications de l'Électricité à la thérapeutique* de M. le docteur A. Becquerel.

Je suis heureux aussi de saisir cette occasion pour adresser à MM. les directeurs de plusieurs Observatoires mes remercîments de l'obligeance avec laquelle ils ont bien voulu me communiquer les principaux éléments magnétiques actuels des stations où se font, sous leur direction les observations de magnétisme terrestre. Les résultats qu'ils m'ont transmis sont consignés dans la note finale C de ce volume.

Je dois ajouter encore que ma tâche, en ce qui concerne ce troisième volume, m'a été singulièrement facilitée par le concours que m'a prêté mon fils, M. Lucien de la Rive, ancien élève de l'École polytechnique de Paris, en se chargeant de la rédaction des notes mathématiques qui terminent le volume et des paragraphes deuxième et quatrième du chapitre des applications physiques, relatifs à l'application des propriétés magnétiques du courant électrique, soit à la production d'un moteur mécanique, soit à divers appareils autres que les télégraphes électriques.

Pendant l'intervalle de près de quatre années, qui s'est écoulé entre la publication du premier et celle du troisième volume de ce Traité, le monde savant s'est enrichi de bien des travaux ayant trait aux matières qui font l'objet des deux premiers volumes. J'ai cherché, pour que mon ouvrage fût autant que possible au niveau de l'état de la science à la fin de 1857, à présenter dans un appendice un résumé des nou-

velles recherches auxquelles je viens de faire allusion. Heureusement que ces travaux récents ne présentent aucune découverte d'une très-grande importance, de sorte que l'on peut considérer l'époque actuelle comme un temps d'arrêt momentané dans la marche de l'électricité; circonstance éminemment favorable à une publication du genre de celle que j'ai entreprise.

Il y a plus : les nouvelles recherches, loin de contredire les théories que j'avais exposées, sont venues plutôt les confirmer et donner en particulier un appui de plus aux observations que j'avais présentées dans la préface de mon premier volume, sur le rôle de l'électricité dans les sciences physiques. Ainsi la phase remarquable dans laquelle semblent entrer les sciences expérimentales, à la suite des faits intéressants qui tendent à établir sur des bases de plus en plus solides le principe de la corrélation des forces physiques, est de nature à agrandir encore le domaine de l'électricité. On y trouve en effet une preuve à ajouter à tant d'autres, que l'électricité est une des formes les plus fréquentes que revêtent les différentes forces de la nature dans leurs transformations, et qu'elle constitue ainsi l'un des principaux liens qui les unissent les unes aux autres, en même temps qu'elles demeurent subordonnées à l'action de cette puissance providentielle qui maintient en équilibre toutes les parties de l'univers.

Genève, décembre 185*.

ERRATA.

Nous nous bornerons à la correct on des fautes graves qui peuvent altérer le sens du texte, sans nous arrêter aux simples erreurs typographiques que le lecteur peut facilement rectifier lui-même.

Page	2,	ligne 9,	les phénomènes eux-mêmes,	*lisez* :	les phénomènes de la vie,
—	13,	—	24, des pieds à la tête,	—	de la tête aux pieds,
—	57,	—	24, constitution musculaire,	—	constitution moleculaire
—	68,	—	36, très-peu aiguisé,	—	tres-bien aiguise,
—	77,	—	34, 56 de chaque côté,	—	48 de chaque côte,
—	96,	—	35, psr nue influence ;	—	par influence ;
—	147,	—	33 (*note*), pieces d'accès,	—	pieces d'acier
—	240,	—	23, horizontale,	—	verticale.
—	241,	—	4, et l'intensite,	—	et d'intensite
—	243,	—	21, déclinaisons *maxima*,	—	declinaisons *minima*
—	*id*,	—	24 et 25, *maximum* à 8 h. 1/4,	—	*minimum* à 8 h 1/4,
—	244,	—	6, et le *maximum* moyen,	—	et le *minimum* moyen
—	253,	—	37 (dernière), diurnes, qui y est,	—	diurnes y est
—	280,	—	7, la positive du sol,	—	la negative du sol
—	324,	—	27 et 28 (*note*), a un coefficient,	—	a un coefficient
—	339,	—	au bas, voyez la note finale G,	—	voyez la note finale D.
—	437,	—	22, 26 et 28 (*note*), Rennes,	—	Rouen,
—	458,	—	(*dans la figure, en bas, à gauche*), *f*.	—	*d*.
—	474,	—	10, têtes *c*,	—	têtes *t*
—	635,	—	16, ce troubla,	—	il est vrai que ce trouble
—	639,	—	8, quelque désordre musculaire,	—	quelque névrose,
—	664,	—	23, d'un demi-millimetre	—	d'un demi-millimètre de diamètre
—	726,	—	7, $+ i_0 \lambda_4$	—	$+ i_0 \lambda_3$
—	703,	—	28, inducteur de la	—	inducteur et la
—	711,	—	2, d'un fil de	—	d'un fil de cuivre de

Digitized by Google

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

SIXIÈME PARTIE
RAPPORTS DE L'ÉLECTRICITÉ AVEC LES PHÉNOMÈNES NATURELS

CHAPITRE PREMIER.
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS LES ACTIONS PHYSIOLOGIQUES.

§ 1. Notions générales sur l'électricité physiologique et particulièrement sur l'électricité animale.

Nous avons vu, en nous occupant des sources de l'électricité, que toute action ou plutôt tout changement dans l'état moléculaire d'un corps est accompagné d'un dégagement d'électricité, que ce changement ait lieu par l'effet d'une action physique, telle que la chaleur, d'une action mécanique ou d'une action chimique. Mais, indépendamment de ces actions simples provoquées par la main de l'homme, il existe dans la nature une multitude d'actions spontanées plus ou moins complexes qui donnent naissance aux phénomènes divers que nous présentent soit les corps organisés, soit les corps inorganiques; ces actions sont également accompagnées de manifestations électriques. Quand les corps qui les éprouvent sont inorganiques, elles doivent être nécessairement comme celles dont nous avons étudié l'effet dans la cinquième partie, ou physiques, ou mécaniques, ou chimiques; seulement, comme elles ne se présentent pas dans des circonstances aussi simples, il faut chercher à les démêler pour expliquer l'origine de l'élec-

tricité qui en résulte. Mais quand les corps sont organiques, la difficulté augmente encore, du moins lorsqu'il s'agit d'un organisme vivant ; il faut alors tenir compte d'une force nouvelle et importante, savoir la force vitale. Nous verrons, en effet, que l'action de cette force est accompagnée chez tous les corps dans lesquels elle existe, d'une production d'électricité qui se manifeste constamment, quoique sous des formes très-variées et à des degrés d'intensité très-différents, et qui cesse avec les phénomènes eux-mêmes. Le problème se complique alors de la question de savoir si les manifestations électriques sont une conséquence directe et immédiate de la force vitale, ou si elles naissent des actions physico ou chimico-physiologiques que détermine cette force, et dont elles ne seraient plus alors qu'un effet indirect. Il va sans dire, en effet, que pour nous la force vitale elle-même n'est point une résultante des forces physiques ou chimiques qui accompagnent la présence de la vie, mais qu'au contraire elle les domine et les met en activité de manière à les faire servir à l'accomplissement des fonctions qui constituent l'organisme vivant.

Quelle que soit, du reste, la cause de l'électricité que manifeste, sous une forme ou sous une autre, tout corps doué de vie, nous nommons cette cause *action physiologique ;* et c'est par l'étude des phénomènes électriques qui accompagnent les actions physiologiques que nous commençons cette sixième partie, en consacrant ce premier paragraphe à un coup d'œil général sur ce sujet dont nous aborderons les détails d'une manière plus particulière dans les paragraphes suivants.

C'est surtout dans les animaux qu'on a reconnu et étudié les phénomènes électriques qui accompagnent la présence de la vie [1], et, parmi les animaux, c'est d'abord dans certains poissons qu'on en a observé les signes les plus prononcés. Il existe quelques espèces de poissons, entre autres la *torpille*, le *gymnote* et le *silure*, qui donnent une violente commotion quand on les irrite en certaines parties du corps ; et on a bien vite

[1] Nous verrons plus loin les tentatives qu'on a faites pour rechercher la présence de l'électricité chez les végétaux vivants.

constaté que cet effet était dû à une décharge électrique, en remarquant que pour l'éprouver il fallait toucher le poisson avec une tige conductrice de l'électricité. Plus tard, on a recueilli cette électricité elle-même, et on s'est assuré qu'elle possédait toutes les propriétés de l'électricité développée par les moyens artificiels. Nous étudierons dans un paragraphe suivant cette source remarquable d'électricité, en examinant de près la structure et les propriétés de l'organe particulier qui semble la produire, et dont sont doués seulement les poissons électriques. Auparavant, nous devons nous occuper des manifestations électriques qu'on est parvenu à observer, mais à un degré beaucoup moindre, chez les autres animaux.

Galvani est le premier qui ait démontré l'existence de l'électricité animale dans la grenouille. Nous avons cité l'expérience fondamentale sur laquelle il avait cru pouvoir d'abord appuyer sa démonstration[1], et qui consistait à mettre en communication les nerfs et les muscles d'une grenouille au moyen d'un arc composé de deux métaux. Mais l'interprétation qu'en donna Volta, en prouvant directement que l'emploi d'un arc métallique hétérogène était l'origine de l'électricité, obligea Galvani à se servir d'un arc homogène pour réunir les muscles et les nerfs de la grenouille. Une discussion très-longue s'éleva alors entre Volta et Galvani et leurs partisans respectifs, relativement à la cause des contractions éprouvées par la grenouille dans l'expérience fondamentale, Volta les attribuant à l'électricité développée par le contact de substances hétérogènes, et Galvani persistant à admettre l'existence d'une électricité animale dont il supposait la négative condensée dans les parties intérieures du muscle, tandis que la positive était à sa surface, le nerf servant de conducteur entre les deux armures de cette espèce de bouteille de Leyde; idée que nous verrons être bien rapprochée de la vérité. Rien n'est plus ingénieux que les expériences par lesquelles Volta chercha à démontrer que la plus légère différence dans l'homogénéité des corps conducteurs en contact suffisait pour donner naissance à

[1] Tome I, page 27.

une électricité rendue sensible par les contractions de la grenouille ; cette électricité étant dans tous les cas, suivant lui, due à une hétérogénéité dans l'arc métallique. Galvani de son côté et son neveu Aldini montraient qu'on pouvait produire les contractions avec des arcs métalliques parfaitement homogènes, ou sans employer de métaux, et n'attribuaient l'influence incontestable de l'hétérogénéité qu'à une augmentation de résistance qui rendait plus forte la décharge de l'électricité animale. L'expérience fondamentale sur laquelle Galvani appuyait l'existence d'une électricité animale consistait à couper les nerfs à leur sortie du canal vertébral, puis, en les soulevant délicatement avec une tige isolante, à les amener en contact avec la surface extérieure d'une des cuisses de la grenouille en un seul point du muscle, si c'est possible ; et aussitôt la cuisse se contractait. Galvani était même parvenu à obtenir la contraction de la cuisse d'une grenouille en mettant son nerf en contact avec un muscle étranger, tel qu'un fragment musculaire du ventre placé sur une plaque de verre, et qui n'avait aucune liaison conductrice avec la grenouille. Cette forme remarquable, donnée par Galvani à son expérience fondamentale, constitue, comme nous le verrons, l'un des phénomènes les plus curieux de l'électricité animale. Toutefois Volta ayant encore objecté que l'électricité développée dans cette dernière expérience était due au contact du muscle et du nerf, et rentrait par conséquent dans le principe général qu'il avait établi sur l'électricité de contact, Galvani plaça sur un plan isolant une cuisse de grenouille munie de son nerf recourbé en demi-cercle ; dans le voisinage, et sans communication avec la première, il disposa une seconde cuisse, et laissa tomber le nerf de cette seconde cuisse préparée sur le nerf recourbé de la première. De cette manière aux deux points de contact il n'y avait que la substance nerveuse ; tout était donc homogène, et cependant, au moment où les deux circuits furent ainsi fermés, les deux cuisses se contractèrent énergiquement.

Galvani ne se borna pas aux expériences sur les grenouilles ; il en fit aussi sur les animaux à sang chaud, et réussit à montrer que le courant d'électricité animale dirigé de l'extrémité

inférieure des membres vers les nerfs n'était pas uniquement propre à la grenouille, mais se retrouvait dans les autres animaux. Ces résultats longtemps contestés ont été plus tard confirmés et étendus par les belles recherches de Matteucci et de Dubois-Reymond. Néanmoins, à l'époque dont nous parlons, les idées de Volta finirent par l'emporter sur celles de son adversaire, le monde savant ne pouvant se refuser de donner raison au physicien qui marchant de faits en faits avec une admirable logique et une puissance d'observation non moins grande, avait été conduit de la décharge d'électricité à peine sensible qu'accuse la contraction de la grenouille, à la pile voltaïque, la source d'électricité la plus énergique que l'homme ait produite jusqu'ici.

Toutefois, de même que Galvani et ses partisans avaient été trop loin en ne voyant dans les contractions de la grenouille qu'un effet de l'électricité animale, quelles que fussent les conditions de l'expérience, Volta et ses partisans avaient eu tort de nier absolument l'existence de cette électricité. C'est ce qu'avait bien senti, sans se laisser dominer par l'autorité alors toute puissante de Volta, l'illustre savant qui a été l'une des plus grandes gloires de l'Europe moderne. Dans un travail publié en 1797 et dont nous avons déjà fait connaître quelques-uns des résultats [1], Humboldt décrivit une série d'expériences par lesquelles il avait réussi à produire des contractions dans les cuisses de grenouille, en ne mettant en contact que le nerf et les muscles et en ayant soin d'éviter toute irritation mécanique. Il obtenait des contractions soit en recourbant la région lombaire de l'animal vers le nerf ischiade avec lequel elle était encore organiquement liée, soit en touchant en même temps, au moyen d'un fragment coupé de nerf crural, le nerf crural et un muscle de la cuisse, soit en touchant le nerf de la grenouille préparée, sur deux points différents, avec un morceau de substance musculaire prise sur la grenouille vivante. Humboldt avait démontré également la possibilité de contractions produites par des arcs réellement homogènes, et il avait

[1] Tome II, page 129.

établi la distinction suivante au moyen de laquelle il était parvenu à concilier d'une manière très-juste les résultats de Galvani et ceux de Volta, savoir que, s'il est vrai qu'il y ait des animaux chez lesquels un arc homogène n'excite aucune contraction, tandis que ces mêmes animaux en manifestent dès que l'arc est le moins du monde hétérogène, d'un autre côté on ne peut admettre que la contractiou musculaire ne puisse avoir lieu qu'autant qu'il y a hétérogénéité.

L'électricité animale, au milieu des découvertes si nombreuses et si brillantes, auxquelles avait donné naissance la pile de Volta, avait été complétement perdue de vue quand trente ans après la publication de l'ouvrage de Humboldt, c'est-à-dire en 1827, Nobili, mettant à profit les moyens d'investigation que la science de l'électricité avait acquis pendant cet intervalle de temps, réussit à constater d'une manière irréfragable et à l'abri de toute objection, l'existence d'un courant électrique dans la grenouille, qu'il nomma le courant propre de la grenouille. C'est en se servant d'un galvanomètre multiplicateur très-sensible qu'il venait d'inventer et que nous avons décrit, qu'il put percevoir ce courant. La grenouille étant préparée à la manière de Galvani, il la faisait plonger d'une part par ses nerfs lombaires, d'autre part par les jambes, dans deux capsules remplies d'eau pure ou mieux d'eau salée[1]; il s'assurait d'abord en réunissant les deux capsules par une mèche de coton mouillée que la grenouille se contractait, comme l'avaient déjà observé Galvani, Humboldt et d'autres; puis enlevant la mèche de coton, il fermait le circuit en plongeant respectivement dans les deux capsules, chacune des extrémités de son galvanomètre terminées par des lames de platine. Il obtenait ainsi un courant de 10°, de 20° et même de 30°; ce courant n'était que de quelques degrés lorsque le liquide contenu dans les capsules était de l'eau pure au lieu d'eau salée plus conductrice. Il était du reste constamment dirigé dans l'animal des pieds à la tête ou des muscles aux nerfs.

Nobili observa plusieurs faits importants sur le courant de

[1] Voyez tome II, page 436, figure 260.

la grenouille. Quoique les grenouilles ne se contractent sous l'action de leur propre courant que peu de temps, au plus pendant un quart d'heure depuis qu'elles ont été préparées, cependant l'action de ce même courant sur le galvanomètre est d'une beaucoup plus grande durée, de plusieurs heures dans bien des cas. Ayant obtenu une déviation de 5° avec une grenouille, il en disposa une seconde dans le circuit à la suite de la première et dans le même sens, et la déviation fut alors de 8°, avec une troisième la déviation fut de 11°. En opposant le courant d'une grenouille au courant d'une autre, il n'y a plus aucun effet; ainsi il n'y a même aucune contraction ni dans l'une ni dans l'autre des deux grenouilles en touchant le nerf et le muscle de l'une respectivement avec le nerf et le muscle de l'autre, tandis qu'elles se contractent fortement toutes les deux quand on met en contact réciproque le nerf de l'une avec le muscle de l'autre.

L'existence d'un courant propre dans la grenouille et indépendant de toute cause extérieure, quoique bien établie par Nobili, n'avait pas attiré toute l'attention qu'elle méritait. C'est aux efforts et aux travaux de M. Matteucci qu'on doit d'avoir mis en relief l'importance de ce fait, et en général d'avoir rendu à l'électricité animale la place qu'elle doit occuper dans les phénomènes électriques et physiologiques. Un autre savant, M. Dubois-Reymond, a fait également des phénomènes électro-physiologiques, comme nous l'avons déjà dit [1], l'objet de travaux aussi nombreux que consciencieux. C'est essentiellement dans les recherches de ces deux savants que nous puiserons les détails dans lesquels nous allons entrer sur ce sujet délicat, détails indispensables à connaître pour l'intelligence de la partie des applications qui aura pour objet la thérapeutique.

§ 2. Du courant propre de la grenouille et du courant musculaire en général.

Matteucci et Dubois-Reymond ont tous les deux fait égale-

[1] Tome II, page 450.

ment usage pour observer les phénomènes électro-physiologiques du galvanomètre et de la grenouille galvanoscopique. Nous avons déjà fait connaître le galvanomètre et en particulier celui de M. Dubois-Reymond [1] ; nous avons également indiqué la manière de préparer la grenouille galvanoscopique et de s'en servir [2]; nous continuerons à appeler de ce nom ce galvanomètre physiologique, lors même qu'au lieu d'être formé par une grenouille tout entière, il ne se compose que d'une cuisse de grenouille munie de son nerf comme la représente la figure 264. Nous nous bornerons donc ici à énumérer les précautions à prendre dans l'emploi de ces deux procédés, surtout du premier. En effet lorsqu'il s'agit de la grenouille galvanoscopique, il faut seulement avoir soin de bien dépouiller le nerf et de fermer le circuit avec le seul nerf sans y comprendre aucune portion du muscle de la jambe. On fait toucher le filament nerveux avec les deux points qu'on soupçonne être les pôles de l'élément électro-moteur qu'on veut étudier, et si la portion du filament nerveux comprise entre ces deux points de contact est effectivement parcourue par un courant électrique, on voit à l'instant la jambe se contracter. On peut même avec un très-grand degré de probabilité déterminer la direction de ce courant ; on n'a qu'à se servir pour cela d'une jambe de grenouille un peu affaiblie, et alors on voit, si le courant est dirigé dans le nerf du côté de la jambe, celle-ci se contracter quand on ferme le circuit, et rester au contraire immobile au moment où l'on ouvre le circuit. L'inverse a lieu si le courant a une direction contraire. On peut sans inconvénient, si l'on veut éviter le contact direct avec les points de l'élément électro-moteur, interposer entre le nerf et ces points deux petites bandes de papier humectées d'eau.

L'emploi du galvanomètre exige plus de précaution. Il faut d'abord éviter l'action chimique des liquides animaux sur les lames de métal, qui servent à mettre dans le circuit les divers organes dont on veut étudier l'état électrique. Dans ce but on

[1] Tome I, page 329.
[2] Tome II, pages 450 et suivantes, figure 264.

Digitized by Google

se sert de lames d'un platine très-pur et de même surface, qu'on a nettoyées avec beaucoup de soin; il faut même les laisser plonger dans de l'eau très-longtemps pour que cette simple immersion ne donne pas naissance à un courant, puis, quand on s'est assuré qu'il n'y a pas d'action, on touche en même temps avec les deux lames les parties animales dans lesquelles on cherche le courant électrique, en ayant soin de tenir ces lames par des manches vernis auxquels elles sont fixées. Mais le seul fait de la circulation d'un courant en polarisant les lames, les rend capables de produire sans autre cause, un courant que nous avons appelé secondaire. On ne peut donc opérer deux fois de suite, sans avoir eu soin de bien dépolariser les lames après la première expérience, ce qu'on fait en les laissant plongées dans un même liquide pendant un certain temps, tout en conservant entre elles une communication métallique. Il est même avantageux pour éviter l'affaiblissement qui résulte pour le courant de cette polarisation dans une même expérience, d'observer la déviation qu'on obtient au premier instant, au lieu d'attendre pour la noter qu'elle soit devenue constante, c'est-à-dire que l'aiguille soit en repos.

Aux précautions que nous venons d'indiquer d'après Matteucci, Dubois-Reymond en a ajouté encore quelques autres d'autant plus indispensables que procédant avec son galvanomètre multiplicateur si sensible que nous avons déjà décrit [1], il devait éviter toute chance d'erreur que rendait plus grande l'excessive délicatesse de son instrument. Voici comment il s'y prend. Il fait communiquer les extrémités de son galvanomètre avec deux lames de platine fixées chacune dans une pince métallique à l'extrémité d'une tige horizontale de laiton qui elle-même est adaptée à une tige semblable mais verticale, le long de laquelle elle peut glisser, et qui est isolée au moyen d'une petite colonne de verre. Les lames de platine plongent dans un vase et peuvent ainsi avoir à volonté un mouvement dans un sens horizontal ou vertical. L'une des extrémités du fil

[1] Tome I, page 329.

du multiplicateur vient s'adapter à l'autre bout de la tige horizontale. La figure 328 représente cet arrangement dont il y a deux semblables, un pour chacune des extrémités du galvanomètre. Chaque lame de platine a 65^{mm},5 de hauteur et 26^{mm},5 de largeur. Les vases dans lesquels elles plongent sont remplis d'une solution concentrée de sel de cuisine, et on a soin, tant qu'on n'opère pas, de tenir le circuit constamment fermé au moyen d'un syphon rempli de la même solution qui unit les liquides des deux vases.

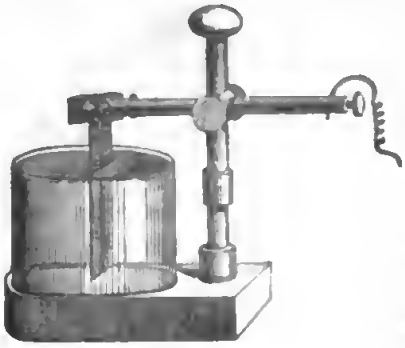


Fig. 328.

Maintenant quand on veut opérer, il est préférable au lieu d'enlever les lames de platine pour les appliquer aux parties animales qui doivent être éprouvées, d'unir les deux vases au moyen de ces parties après avoir enlevé le syphon, en laissant ainsi les lames en repos dans le liquide où elles sont immergées. Mais l'immersion immédiate des parties animales dans la solution saline n'est point convenable quand il s'agit d'expériences délicates, à cause des perturbations qui peuvent naître de l'action corrosive qu'exerce sur ces parties la solution concentrée. Pour l'éviter, M. Dubois-Reymond emploie des coussinets, soit compresses, formés d'un très-grand nombre de couches d'un papier très-fin, qui humectés de la solution saline, sont appliqués sur le bord des vases de communication (fig. 329). Un troisième bourrelet sert à fermer le circuit en unissant les deux premiers quand on n'opère pas, et pour dépolariser les lames quand on a opéré. On a ainsi un courant secondaire inverse du courant primaire et dont l'intensité est proportionnelle à celle de ce dernier. Puis ce courant cesse quand les lames sont dépolarisées et on peut recommencer l'expérience. Pour introduire

Fig. 329.

dans le circuit la partie animale dont on veut éprouver l'état électrique, on commence par enlever le coussinet additionnel, puis au lieu de placer immédiatement en contact les parties animales avec les coussinets conducteurs humectés de la solution saline, ce qui pourrait déterminer la corrosion dont nous avons parlé, on recouvre la surface de ces bourrelets d'une peau de vessie de cochon sur laquelle on a étendu du blanc d'œuf; la communication électrique n'est point arrêtée et on évite cependant ainsi tout contact immédiat entre les parties animales et la dissolution saline.

M. Matteucci, après beaucoup de recherches sur le courant propre de la grenouille, sur lesquelles nous reviendrons dans l'instant, était parvenu à constater l'existence d'un courant électrique musculaire. C'est en coupant le muscle d'un animal vivant et en introduisant dans la blessure le nerf de la grenouille galvanoscopique de manière que le bout du nerf touchât le fond de la blessure pendant qu'un autre point du même nerf en touchait les bords, qu'il obtenait une contraction prononcée de la grenouille, ce qui prouve l'existence d'un courant électrique dirigé dans le muscle de l'intérieur à la surface. L'expérience réussit quel que soit le muscle et quel que soit l'animal dont le muscle est touché, et même lorsque les muscles sont séparés de l'animal depuis quelque temps. Avec un lapin, M. Matteucci a obtenu une forte contraction du muscle de la jambe en mettant en contact avec la surface de ce muscle le nerf crural dont une portion assez longue avait été mise à nu.

Pour rendre plus sensible l'effet du courant musculaire et en obtenir des signes prononcés au galvanomètre, M. Matteucci a réussi à en augmenter l'intensité en réunissant, comme pour

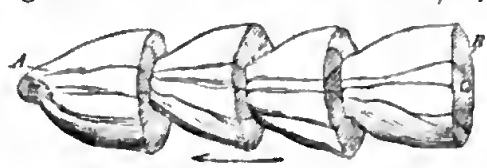


Fig. 330.

en former une espèce de pile, plusieurs muscles séparés. Ainsi ayant préparé un certain nombre de demi-cuisses de gre-

nouilles, il les a disposées les unes à la suite des autres de manière que tout en étant en contact, la face interne de chacune d'elles fût tournée du même côté (fig. 330). Ainsi dans chaque point de contact des deux demi-cuisses voisines, c'est d'une part l'intérieur du muscle, et de l'autre la surface, qui se touchent, de sorte que par suite de cette disposition, l'une des extrémités de la pile est terminée par l'intérieur du muscle, tandis que l'autre est formée par la surface. Les deux extrémités sont en communication avec de l'eau distillée dans laquelle on plonge les lames de platine du galvanomètre après s'être assuré, qu'immergées dans le même liquide elles ne transmettent aucun courant. Aussitôt on obtient un courant qui varie d'intensité avec le nombre des demi-cuisses de grenouille dont la pile est composée ; il est de 3° ou 4° avec deux, de 6° à 8° avec quatre, de 10° à 12° avec six. Si l'on emploie, pour établir la communication avec les lames du galvanomètre, de l'eau légèrement acide, saline ou alcaline, on obtient un accroissement considérable dans l'intensité du courant, sans que sa direction en soit modifiée; cette direction est telle que le courant est toujours dirigé dans la pile de la partie interne du muscle à sa surface. On peut constater de la même manière l'existence de ce courant dans toutes les masses musculaires prises sur différents animaux à sang chaud ou froid récemment tués. Ainsi une pile de huit couples formée avec des tranches des muscles pectoraux de pigeon récemment tués, a donné un courant de 14° degrés toujours dirigé dans la pile, de l'intérieur du muscle à la surface. M. Matteucci a beaucoup varié ses expériences et elles l'ont toutes conduit à la même conséquence ; il est même parvenu à constater l'existence de ce courant sur un animal vivant tel qu'un lapin, un mouton, un pigeon, en blessant un muscle de sa poitrine ou de sa cuisse après en avoir découvert la surface et en touchant dans le même temps, avec les deux lames du galvanomètre, l'intérieur de la blessure et la surface du muscle, ce qui déterminait un courant de 20° à 30° et même de 40° allant toujours dans le muscle, de l'intérieur à la surface.

En opposant l'un à l'autre, au moyen d'un galvanomètre différentiel, les courants de deux piles composées du même nom-

bre d'éléments musculaires, M. Matteucci a trouvé que le courant le moins fort est celui qui est produit par les muscles de l'animal le plus élevé dans l'échelle des êtres ; mais cette différence peut tenir moins à une intensité originelle plus faible qu'à un affaiblissement plus rapide du courant dans les animaux plus élevés dans l'échelle.

L'existence d'un courant musculaire étant bien constatée, M. Matteucci a fait du courant propre de la grenouille l'objet d'un examen détaillé. Nous avons déjà exposé plus haut comment Nobili était parvenu à constater, au moyen du galvanomètre, l'existence de ce courant qui est toujours dirigé des pieds à la tête dans le corps de l'animal, et par conséquent du nerf aux jambes dans le galvanomètre. L'intensité de ce courant varie, toutes les autres circonstances restant les mêmes, avec la vitalité propre de l'animal. Si la grenouille est robuste et a été préparée promptement, on voit ses muscles se contracter au même moment où l'on ferme le circuit avec le galvanomètre. M. Matteucci a réussi à augmenter les signes de ce courant en disposant plusieurs grenouilles préparées à la manière de Galvani, à la suite les unes des autres sur un plan isolant, de façon que les nerfs de chaque grenouille soient en contact avec les jambes de la suivante. Les deux extrémités de cette pile plongent dans deux capsules remplies d'eau distillée ou légèrement salée. Le courant est toujours dirigé des pieds à la tête dans chacune des grenouilles. On voit souvent toutes les grenouilles se contracter au moment où l'on ferme le circuit avec le fil du galvanomètre. Au reste, cette contraction qui est due au courant propre de la grenouille, s'effectue quel que soit le conducteur qu'on emploie pour unir les muscles de la jambe avec les nerfs lombaires mis à nu.

Les signes du courant propre de la grenouille se prolongent plus ou moins suivant le degré de vitalité de l'animal. La contraction propre cesse ordinairement après 10 ou 15 minutes ; il est fort rare qu'elle se prolonge jusqu'à 30 ; mais au galvanomètre les signes du courant persistent plus longtemps. Ainsi des piles de huit à dix grenouilles qui donnaient en commençant une déviation de 30° à 40° au galvanomètre, la produi-

saient encore au bout de quinze minutes. Elles donnaient encore une déviation sensible après plusieurs heures, et il fallait souvent qu'il s'écoulât plus d'un jour pour qu'elles n'en donnassent plus.

En disposant les grenouilles de manière à opposer leurs courants et en étudiant l'effet des différentes parties du corps de l'animal, M. Matteucci est arrivé à reconnaître que l'élément électromoteur complet de la grenouille est formé par l'un de ses membres, composé lui-même d'une jambe, d'une cuisse, de son nerf spinal et d'un morceau d'épine. Il a de plus conclu de diverses expériences : 1° que le courant propre de la grenouille persiste dans sa direction et dans son intensité, sans la moelle épinière, sans les nerfs spinaux et cruraux, et quoique l'animal soit privé de tous les filaments nerveux de la masse musculaire de la cuisse; 2° que par conséquent l'élément électromoteur se réduit aux muscles de la jambe et de la cuisse unis organiquement; 3° que quand on laisse à la grenouille préparée à la manière ordinaire, sa moelle épinière, ses nerfs et ses ramifications dans les muscles, ces parties nerveuses agissent dans la production du courant, comme le fait la substance musculaire de la cuisse.

Il résulte de là que la fonction du système nerveux dans la production du courant musculaire, comme dans celle du courant propre de la grenouille, semble se réduire à celle d'un corps simplement conducteur du courant développé dans la partie du muscle de laquelle il est le plus rapproché. M. Matteucci a confirmé cette conclusion par des expériences directes faites sur des cuisses de grenouille auxquelles il avait laissé le nerf lombaire, et en posant chaque filament nerveux sur la surface musculaire de chaque cuisse; il obtenait ainsi avec une pile de huit éléments, un courant musculaire dirigé du muscle au nerf, ou plutôt de l'intérieur du muscle à sa surface à travers le nerf qui agit comme l'intérieur du muscle dans lequel il se ramifie. On réussit tout aussi bien avec des jambes de lapin ou de pigeon, en découvrant dans ces jambes le filament nerveux ou le nerf crural qui est caché dans le muscle, et on forme la pile en faisant toucher dans chaque élément le nerf, au

lieu de l'intérieur du muscle, avec sa surface. Ces piles donnent le même courant musculaire; seulement ce courant est dans tous les cas plus faible quand le filament nerveux fait partie du circuit. Ainsi soit dans le courant propre de la grenouille, soit dans le courant musculaire, la direction du courant est tout à fait indépendante de la présence du nerf qui n'agit que comme mauvais conducteur représentant l'état électrique de la partie du muscle qui en est le plus rapprochée. Une manière très-évidente de confirmer cette conclusion consiste à couper par le milieu, en leur enlevant la partie inférieure, des cuisses de grenouilles séparées de leurs jambes, mais ayant conservé leurs nerfs lombaires; puis on forme la pile avec ces éléments en faisant toucher le nerf avec l'intérieur du muscle (fig. 331); cette

Fig. 331.

pile donne le courant musculaire dirigé toujours de l'intérieur du muscle à la surface, c'est-à-dire dans ce cas, de l'intérieur du muscle au nerf qui communique avec la surface du muscle. Ainsi quoique relativement au nerf, la direction du courant dût être renversée, elle demeure la même parce que les parties du muscle sont disposées de la même façon les unes à l'égard des autres. En disposant la pile différemment de manière que le filament nerveux de chaque grenouille repose, non plus sur la partie intérieure, mais sur la surface même du muscle de

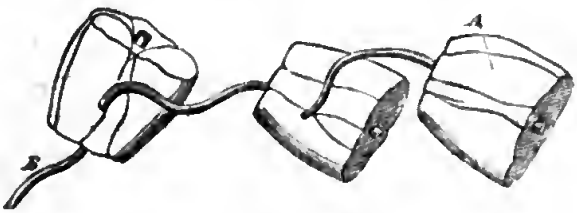


Fig. 332.

chaque cuisse (fig. 332), on n'a plus qu'un courant très-faible qui est dirigé comme si la cuisse entière était dans le circuit,

c'est-à-dire de la partie supérieure de la demi-cuisse ou du nerf lombaire, à la surface du muscle dans l'animal ; ce léger courant est dû à la petite portion du muscle qu'on est obligé de mettre à nu en coupant le bassin.

Quant à l'analogie qui semble exister entre le courant musculaire et le courant propre de la grenouille, M. Matteucci, tout en la pressentant, ne l'avait pas démontrée; il avait en effet cherché en vain à trouver dans d'autres animaux l'existence d'un courant analogue à celui du courant propre de la grenouille, et il n'avait trouvé que le courant musculaire que donne également la grenouille en même temps qu'elle présente son courant propre, qu'on obtient sans altérer le muscle, sans mettre à nu sa partie interne, et qui est dirigé de la surface du muscle à son nerf dans l'animal. Il semblait donc disposé, en ne consultant que la voie expérimentale, à ne pas reconnaître d'identité entre les deux genres de courant. Il est vrai que plus tard il avait été amené à une opinion contraire en étudiant le rôle de la fibre tendineuse qui compose la plus grande partie de la jambe de la grenouille, dans la production du courant propre de cet animal, en même temps que M. Cima arrivait aussi de son côté par le même genre de considérations à ramener le courant propre de la grenouille à un cas particulier du courant musculaire. Mais à cette époque, ainsi que M. Matteucci l'a reconnu lui-même, M. Dubois-Reymond avait déjà prouvé cette identité par la connaissance des lois élémentaires du courant musculaire qu'il avait découvertes, et que nous allons exposer en commençant par les recherches qu'il fit sur ce même courant propre de la grenouille, point de départ depuis Galvani de tous les travaux importants d'électro-physiologie.

Après avoir constaté, au moyen de son appareil muni de toutes ses pièces et d'après les méthodes déjà décrites, l'existence de ce courant dans la grenouille ordinaire (*rana esculenta*), M. Dubois-Reymond parvint à en démontrer l'existence, quoiqu'à un plus faible degré, dans d'autres espèces de grenouilles ainsi que dans des tortues, comme Humboldt l'avait déjà observé dans la *salamandra maculata*, dans la *lacerta agilis*, et même dans

une jambe de pigeon et dans celle d'un lapin. Puis, en étudiant les différentes manières de produire les contractions de la grenouille par son courant propre sans l'intermédiaire d'aucun métal, il trouva que l'une des meilleures est celle employée par Nobili, et qui consiste à placer sur un plan isolant deux grenouilles préparées par la méthode de Galvani, de façon qu'elles forment un circuit dans lequel les nerfs de chacune sont en contact avec les muscles de l'autre.

M. Dubois-Reymond reconnut bientôt dans la production de ce courant le rôle du muscle gastrocnémien de la grenouille, au moyen duquel il parvint à déterminer soit une contraction dans une grenouille préparée, soit une déviation du galvanomètre. Pour obtenir cette déviation, il détacha par ses extrémités tendineuses le muscle gastrocnémien de la grenouille, sans en blesser la chair; puis il le plaça en travers des deux bourrelets de manière que l'extrémité du côté du tendon d'Achille débordât davantage le coussinet que l'autre, et il obtint un courant dirigé dans le muscle de la première extrémité à la seconde, et par conséquent ayant le même sens que dans la grenouille. D'autres muscles soit de la grenouille, soit d'autres animaux à sang chaud et à sang froid, placés de la même manière, donnent naissance à des courants dirigés tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Toutefois ces différences de direction parurent à M. Dubois-Reymond provenir des différences de conditions dans lesquelles elles étaient obtenues plutôt que de différences dans le pouvoir électromoteur des muscles. Il s'efforça donc, après avoir bien établi que le courant propre de la grenouille était dû à des courants musculaires, à mettre en évidence ces courants sous leur forme la plus simple, et à en déterminer les lois.

Pour trouver la loi du courant musculaire, il faut d'abord étudier la façon dont se comporte un seul et même muscle, suivant la manière dont il est placé sur les coussinets qui servent à le mettre dans le circuit du galvanomètre. On prend pour cela un muscle qui, placé entre les deux coussinets de manière à être en contact avec eux par ses extrémités tendineuses tout en étant supporté par une petite lame de verre (fig. 333), ne

donne naissance à aucun courant ; le grand muscle adducteur est l'un des plus convenables pour ce genre d'expérience, parce

Fig. 333.

Fig. 334.

qu'il est celui dont la forme est la plus symétrique. Si maintenant on dispose le muscle de façon (fig. 334) que l'une de ses extrémités *a* soit en contact avec l'un des coussinets pendant qu'en élevant l'autre extrémité *b*, c'est la chair rouge du muscle qui est en contact avec l'autre coussinet, on obtient un très-fort courant qui va dans le muscle de l'extrémité tendineuse vers le point touché de la chair musculaire. Si, après avoir détruit les polarités secondaires en faisant communiquer entre eux les coussinets par le coussinet auxiliaire (fig. 329), on dispose le muscle semblablement, mais de manière que ce soit l'extrémité *b* qui soit en contact avec le coussinet (fig. 335), on obtient encore un très-fort courant toujours dirigé de l'extrémité tendineuse vers la chair musculaire. Il résulte de cette double expérience que si *a* se trouve être l'extrémité supérieure du muscle dans l'animal, c'est-à-dire la plus rapprochée de la tête, on aurait dans le premier cas (fig. 334) un courant descendant, et dans le second (fig. 335) un courant ascendant ; preuve que la distinction entre les courants descendant et ascendant ne tient en réalité à aucune différence de la moindre importance, puisqu'on peut obtenir l'une ou l'autre direction suivant la position qu'on donne au même muscle. Remarquons encore que lorsque les points de contact du muscle avec les coussinets appartiennent des deux côtés également à la chair musculaire rouge toute seule, il n'y a pas de courant, ou du moins il n'y en a qu'un très-léger.

Fig. 335.

Il semblerait résulter au premier abord, des expériences qui

précèdent, qu'il existe une hétérogénéité entre le tendon et la fibre musculaire proprement dite; mais nous allons voir que ce n'est point le cas, et que le tendon joue simplement le rôle d'un revêtement conducteur, inactif par lui-même. En effet, si après avoir durci dans de l'eau chaude ou dans de l'alcool étendu un muscle gastrocnémien ou un muscle extenseur de la jambe, on y opère une section longitudinale en le déchirant ou en le coupant dans le sens des fibres, on s'aperçoit que le revêtement tendineux, le tendon d'Achille par exemple, ne s'étend pas au delà des points où les extrémités des fibres musculaires élémentaires viennent s'attacher, ce qui nous montre que le tendon peut être considéré comme le revêtement naturel de la section transversale des muscles, soit comme une surface formée par la réunion des bases des fibres considérées comme des cylindres ou comme des prismes. La chair musculaire rouge peut de son côté être regardée comme la section longitudinale naturelle, soit comme une surface formée par les côtés de ces fibres considérées comme des cylindres ou des prismes. Dès lors pour expliquer les effets observés, il suffit d'admettre que les deux surfaces du muscle, la longitudinale et la transversale, sont hétérogènes, le tendon étant considéré comme un revêtement de la section transversale naturelle, simplement conducteur et indifférent au point de vue électrique.

L'expérience confirme tout à fait cette manière de voir; ainsi la section artificielle qu'on obtient en coupant un muscle transversalement avec une paire de ciseaux très-tranchants, se comporte exactement comme la section naturelle transversale revêtue de la membrane tendineuse. On n'obtient en effet aucun courant ou un courant à peine sensible en plaçant entre les coussinets la partie moyenne d'un muscle terminée par deux sections transversales artificielles, tandis qu'on obtient un effet très-prononcé en mettant en contact avec les coussinets d'un côté une section transversale artificielle, de l'autre la section longitudinale (fig. 336), le courant étant toujours dirigé dans le muscle de la section transversale à la longitudinale. Une section longitudinale arti-

Fig. 336.

ficielle obtenue en coupant le muscle dans la direction des fibres se comporte aussi comme la section naturelle, de sorte qu'on peut résumer la loi du courant musculaire en disant que *chaque point de la section longitudinale naturelle ou artificielle d'un muscle est positif par rapport aux points de la section transversale soit naturelle, soit artificielle.*

En étudiant les rapports électriques des différents points d'une même section les uns par rapport aux autres, on trouve aussi bien quand cette section est artificielle que lorsqu'elle est naturelle, que les points qui sont les plus rapprochés du centre quand il s'agit de la section transversale, et du milieu quand il s'agit de la longitudinale, sont négatifs par rapport à ceux qui en sont les plus distants. C'est ce qu'on prouve pour le dernier cas, en plaçant le muscle (fig. 337) de façon qu'il repose par sa section longitudinale sur les deux coussinets également, mais en ayant soin que l'une des extrémités du muscle, l'extrémité *a* par exemple, soit plus rapprochée du coussinet que l'extrémité *b;* on a alors un courant faible, mais cependant bien déterminé, cheminant dans le muscle de *a* en *b*. Pour le cas de la section transversale, il faut prendre le muscle d'un lapin (le *triceps femoris*), celui de la grenouille étant trop petit pour cette expérience. On a soin d'opérer la section du muscle avec un instrument bien tranchant, de manière à avoir une surface bien nette; puis on touche différents points de cette surface avec les extrémités taillées en biseau, bien aiguës de deux coussinets auxiliaires communiquant comme les autres avec les extrémités du galvanomètre, et qui sont construits et humectés de la même manière (fig. 338). Du reste les courants qu'on obtient en mettant en communication deux points non symétriques d'une même section transversale ou

Fig. 337.

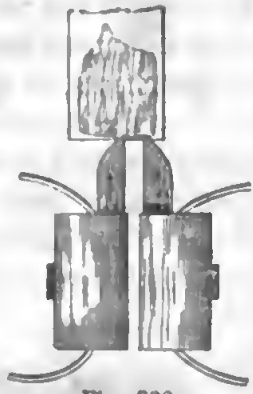


Fig. 338.

longitudinale, sont beaucoup plus faibles que ceux qui résultent de la communication établie entre les deux sections.

La loi du courant musculaire, telle que nous venons de l'établir, est générale; M. Dubois-Reymond a constaté qu'elle n'est point bornée à quelques espèces d'animaux seulement. Il l'a vérifiée sur le muscle de la jambe amputée d'un homme, sur les muscles du lapin, du cochon de mer, de la souris ordinaire, du pigeon, du moineau, de la tortue, du lézard, de la couleuvre, de diverses espèces de grenouilles, du crapaud, des salamandres terrestres et aquatiques, de l'écrevisse et même du ver de terre; pour ce dernier il suffisait de prendre comme muscles des fragments entiers de son corps.

Il est facile maintenant de voir que la loi élémentaire du courant musculaire telle qu'elle a été établie par M. Dubois-Reymond déjà en 1843, rend parfaitement bien compte des phénomènes et des lois plus complexes découverts par Matteucci[1], soit antérieurement, soit postérieurement à cette époque, et en particulier du courant propre de la grenouille qui n'est plus qu'un cas particulier très-remarquable du courant qui résulte de la communication établie entre la section longitudinale du muscle gastrocnémien et la section transversale recouverte dans ce cas par la membrane formant le tendon d'Achille, et particulièrement développée dans la jambe de la grenouille. En effet le muscle gastrocnémien, comme le muscle triceps de la grenouille, offre des sections transversales naturelles là où les faisceaux musculaires vont aboutir aux tendons, les aponévroses musculaires n'étant alors que des revêtements de ces sections transversales naturelles.

M. Dubois-Reymond a comparé au point de vue de l'énergie du courant musculaire, les différents muscles les uns aux autres,

[1] La loi établie par M. Matteucci que le courant marche toujours dans un muscle de l'intérieur de ce muscle à sa surface, n'est en effet que la conséquence de celle plus élémentaire établie plus tard par M. Dubois-Reymond, que le courant marche de la section transversale à la longitudinale dans la fibre musculaire. Il y a même des cas, comme lorsqu'il s'agit des muscles du cœur, où la loi de M. Matteucci et celle de M. Dubois-Reymond se trouvent être identiques, ainsi que nous allons le voir dans l'instant.

et il a trouvé que le courant est d'autant plus intense que le muscle est destiné à exercer une action mécanique plus grande, que cette action soit volontaire ou involontaire. Ainsi les faisceaux du cœur qui ne sont pas soumis à l'empire de la volonté manifestent un courant énergique comme les muscles destinés à la vie de relation qui sont tous faits pour obéir à la volonté, tandis que les faisceaux musculaires des intestins montrent un courant très-faible comme n'ayant à exercer que de faibles actions mécaniques. M. Matteucci avait démontré le premier la puissance électromotrice des muscles du cœur, en opérant avec une pile de cœurs de pigeons coupés transversalement. M. Dubois-Reymond a opéré sur des cœurs isolés de grenouilles, de cochons de mer et de souris domestiques, et il a observé que leur section artificielle est négative par rapport à leur surface extérieure. Des cœurs intacts produisent aussi de forts courants, et l'extrémité du cœur représente alors la section transversale.

L'existence du courant musculaire une fois bien constatée, on peut se demander quelle en est la cause ; est-il le résultat indirect de l'action chimique qui accompagne la respiration, est-il une conséquence plus immédiate de l'organisme vivant ? Nous reviendrons plus loin sur cette question délicate, quand nous aurons étudié les diverses causes qui peuvent exercer de l'influence sur le courant musculaire. Mais quelle que soit l'origine de ce courant, on peut chercher à savoir le rapport qui existe entre sa puissance et celle des courants produits par les sources ordinaires de l'électricité dynamique. C'est cette question que M. J. Regnauld a tenté de résoudre en comparant la force électromotrice d'un muscle à celle d'un couple thermo-électrique bismuth et cuivre (avec différence de 0° à 100°) pris pour unité. En opérant avec des précautions convenables[1] sur le muscle gastrocnémien de la grenouille, il a trouvé que le

[1] Entre autres précautions, M. J. Regnauld emploie, afin d'éviter les polarités secondaires, pour fermer le circuit, une dissolution concentrée de sulfate de zinc avec des électrodes en zinc, au lieu d'une dissolution de sel ordinaire avec des lames de platine.

maximum de la force électromotrice était compris entre 5 et 4 unités thermo-électriques. Le faisceau des muscles de la cuisse de grenouille qui a servi constamment de couple à M. Matteucci dans sa pile musculaire présente une valeur plus considérable ; sa force électromotrice est comprise entre 9 et 10 unités. Ces nombres sont indépendants de la taille de l'animal, mais varient dans le même animal d'un muscle à l'autre. Cette différence se manifeste également dans les animaux à sang chaud. Ainsi en prenant sur un lapin trois muscles différents préparés très-rapidement, M. J. Regnauld a trouvé pour la force électromotrice 7 à 6 unités pour le muscle gastrocnémien, 11 à 10 avec le jambier, et seulement 6 à 5 avec le biceps. Il a confirmé numériquement le fait déjà signalé, qu'il faut plus de temps, pour tomber au même degré d'affaiblissement, à la force électromotrice du muscle de l'animal à sang froid qu'à celle du muscle d'un mammifère.

§ 3. Théorie du courant musculaire ; influence sur l'intensité de ce courant de diverses causes et en particulier de la contraction. — Contraction induite, soit secondaire.

A la suite d'un très-grand nombre d'expériences aussi délicates que difficiles, M. Dubois-Reymond a réussi à démontrer que l'élément électromoteur est, dans le muscle, chaque fibre élémentaire ; il est parvenu en effet, avec la dextérité qui le distingue, à obtenir, au moyen d'un simple faisceau élémentaire disposé de manière à mettre en communication par les coussinets de l'appareil, la section transversale et la section longitudinale, un courant de 8 à 10°. Ce point établi, quelle disposition faut-il supposer aux parties constitutives, c'est-à-dire aux molécules organiques du faisceau élémentaire pour expliquer les effets observés? Pour en avoir une idée, M. Dubois-Reymond estime qu'on peut se faire une image grossière il est vrai, mais cependant assez ressemblante du faisceau élémentaire, en l'assimilant à un cylindre de cuivre recouvert sur sa surface courbe d'une couche de zinc, ses deux bases restant de cuivre pur. Ce cylindre, plongé dans une solution conductrice, donnera nais-

sance à une quantité de courants qui partiront des différents points de la surface de zinc pour aboutir à ceux des deux bases de cuivre; maintenant, en établissant une communication au moyen d'un corps conducteur entre un point de la surface longitudinale de zinc et un point de la surface transversale de cuivre, on aura un courant dérivé tout à fait analogue à ceux qu'on obtient en faisant communiquer la section longitudinale et la section transversale d'un muscle. On peut même expliquer comment on obtient un courant en touchant deux points non symétriques de la même section; car il est facile de voir que, même avec le cylindre métallique dont il vient d'être question, les courants qui circulent des différents points de la surface de zinc à ceux des surfaces de cuivre des bases, ne sont pas tous égaux, et qu'on peut déterminer les courbes iso-électriques ou d'égale tension électrique. Dès lors, avec le cylindre comme avec le muscle, on pourra obtenir des signes de courant beaucoup plus faibles il est vrai que dans le cas fondamental, en touchant des points de la même surface qui ne correspondent pas aux points d'une courbe iso-électrique.

Chaque fragment isolé, soit chaque fibre élémentaire d'un muscle, peut donc être assimilé au cylindre dont nous venons de parler, et les courants qu'il nous fournit ne sont, comme ceux du cylindre, que des courants dérivés, par conséquent beaucoup plus faibles que les courants qui circulent réellement à travers la matière conductrice dont il est composé. Pour expliquer maintenant cet état électrique, il faut admettre que chaque molécule organique dont se compose le faisceau musculaire est électrique naturellement, et qu'elle possède les deux électricités à l'état libre. M. Dubois-Reymond estime que ces molécules dont la forme peut être quelconque, mais qu'il suppose être sphériques, ont chacune une zone équatoriale positive et deux zones polaires négatives; il suppose de plus qu'elles sont disposées de façon que les diamètres qui passent par les pôles négatifs de chacune sont parallèles entre eux et à l'axe du faisceau musculaire; il nomme ces molécules *péripolaires*. Nous sommes disposés à croire, tout en adoptant l'analogie au point de vue électrique du faisceau musculaire

Digitized by Google

avec le cylindre de cuivre recouvert de zinc dans sa surface courbe, qu'on peut très-bien l'expliquer en admettant que les molécules organiques n'ont que deux pôles électriques, l'un positif, l'autre négatif, hypothèse que nous avons déjà énoncée pour les molécules inorganiques; mais seulement nous sommes conduits à supposer, comme M. Dubois-Reymond, au reste, est obligé de le faire pour expliquer les phénomènes électriques du muscle, que, par l'effet de la vie, ces molécules affectent une disposition particulière. Elles ne se disposent point, en effet, comme dans une substance inorganique abandonnée à elle-même, de manière qu'il s'établisse un équilibre électrique par l'effet de la neutralisation mutuelle de toutes les électricités moléculaires, mais de façon que dans chaque tranche transversale du faisceau musculaire les pôles positifs des molécules soient tournés en dehors et les pôles négatifs en dedans. Les électricités positive et négative des molécules de chaque tranche, qui rayonnent du centre à la circonférence, se neutralisent, sauf la positive de celles qui sont à la circonférence et la négative de celles qui sont au centre. Mais ces deux électricités libres se réunissent par la surface extérieure du muscle en formant des courants parfaitement semblables à ceux qui s'établissent sur la surface humide qui recouvre le cylindre cuivre-zinc, et dont nous ne percevons non plus qu'une portion dérivée dans les expériences où nous faisons communiquer entre elles les sections transversale et longitudinale d'un muscle, ou deux points non symétriques de la même section[1]. Telle serait donc la disposition des molécules dans chaque faisceau musculaire élémentaire, d'où résulterait naturellement un état électrique

[1] La disposition que nous supposons être imprimée par l'effet du principe vital aux molécules qui constituent la fibre musculaire, nous paraîtrait se concilier d'une manière remarquable avec la supposition que nous avons faite (t. I, p. 570), que l'état électrique polaire est dû à un mouvement de rotation primitif que possède chaque atome de la matière autour d'un axe dont les deux pôles sont, l'un le positif, l'autre le négatif. On comprendrait en effet que le principe vital agirait en obligeant les molécules qui constituent une fibre, à se disposer de façon que leur mouvement de rotation s'accomplisse pour toutes dans le même sens autour de l'axe du faisceau.

négatif à tous les points des deux bases ou extrémités du faisceau musculaire complet, et un état positif à tous les points de la surface longitudinale. L'état électrique des sections artificielles, soit transversales, soit longitudinales, serait évidemment aussi la conséquence de la même distribution des particules. Nous verrons dans l'instant que l'hypothèse que nous venons d'énoncer sur le mode d'arrangement des molécules organiques dans la fibre musculaire, trouve une confirmation remarquable dans les phénomènes qui résultent de l'action des diverses causes qui modifient le courant musculaire.

Ainsi donc, quelle que soit la manière dont on envisage la disposition et le rôle des molécules organiques dans la fibre musculaire, on peut conclure d'une manière presque certaine de l'étude que nous avons faite, que l'état électrique des muscles est celui d'un circuit fermé, et que le courant qu'on perçoit, soit par le galvanomètre, soit par la grenouille galvanoscopique, n'est qu'un courant dérivé dont l'intensité est bien plus faible que celle du courant musculaire principal.

Du reste, l'analogie que nous avons établie entre le muscle et une chaîne électrique trouve une confirmation dans le fait observé par M. Dubois-Reymond, que la force électromotrice des muscles s'accroît avec leur largeur et leur épaisseur. Il n'a pas trouvé que l'extension ou la compression d'un muscle exerçassent une influence bien sensible sur le courant musculaire, et il attribue la petite diminution qu'il a quelquefois observée comme étant exercée par ces actions sur l'intensité de ce courant, à l'altération qu'elles font éprouver à la force vitale du muscle.

C'est un point, en effet, très-important à signaler que le décroissement qu'éprouve le courant musculaire, à partir de la mort de l'animal ou du moment où le muscle a été détaché de son corps. M. Matteucci avait observé que ce décroissement est d'autant plus rapide que l'animal occupe un rang plus élevé dans l'échelle des êtres; M. Dubois-Reymond attribue cette différence à ce que les animaux à sang chaud, les mammifères et les oiseaux, perdent leur irritabilité musculaire après la

Digitized by Google

mort, beaucoup plus vite que les poissons et les reptiles. Or, suivant lui, la diminution dans l'intensité du courant musculaire après la mort est proportionnelle au degré d'excitabilité du muscle; et la force électromotrice, aussi bien que cette excitabilité, ont pour terme la rigueur cadavérique, qui provient, ainsi que Brooke l'a démontré, de la coagulation de la fibrine contenue dans les muscles en dehors des vaisseaux sanguins. Il résulte donc de là que le phénomène du courant musculaire doit être considéré comme un phénomène qui ne peut avoir lieu que dans un tissu organique vivant, et qui, une fois qu'il a disparu par la rigidité cadavérique, ne peut se reproduire, lors même que cette rigidité a cessé, et que par conséquent l'état de décomposition a commencé : preuve de plus que la force électromotrice musculaire est bien dépendante de la disposition que la force vitale imprime aux molécules organiques dans la structure du muscle, disposition qui dure encore quelque temps après la mort de l'animal autant que l'irritabilité, mais qui disparaît dès que, la décomposition commençant, les particules n'obéissent plus qu'aux forces qui régissent la matière inorganique.

Mais de toutes les causes qui peuvent exercer de l'influence sur le courant musculaire, la plus importante sans contredit est la contraction du muscle lui-même, contraction qu'on détermine par l'irritation nerveuse, c'est-à-dire en imprimant à un nerf moteur par des moyens physiques, mécaniques ou chimiques, cet état particulier qui se traduit par la contraction du muscle. De tous ces moyens le plus efficace est la transmission d'un courant électrique à travers le nerf, transmission qui peut même produire le tétanos, c'est-à-dire une contraction continue, en ayant lieu elle-même par une suite d'oscillations ou d'intervalles successifs très-rapprochés les uns des autres; c'est ce que nous avons déjà vu dans la quatrième partie de ce Traité[1]. Mais l'emploi d'un courant électrique pour déterminer la contraction musculaire exige bien des précautions, quand on veut étudier l'influence de cette contraction sur le courant mus-

[1] Tome II, pages 450 et suivantes.

culaire lui-même, car il faut éviter avec grand soin l'influence exercée directement sur ce courant par l'électricité employée seulement comme moyen d'avoir la contraction. C'est sous ce rapport que la méthode dont s'est servi M. Dubois-Reymond nous paraît éminemment propre à donner des résultats à l'abri de toute objection.

On place un muscle gastrocnémien de la grenouille (fig. 339) sur les coussinets ordinaires de façon que son nerf vienne repo-

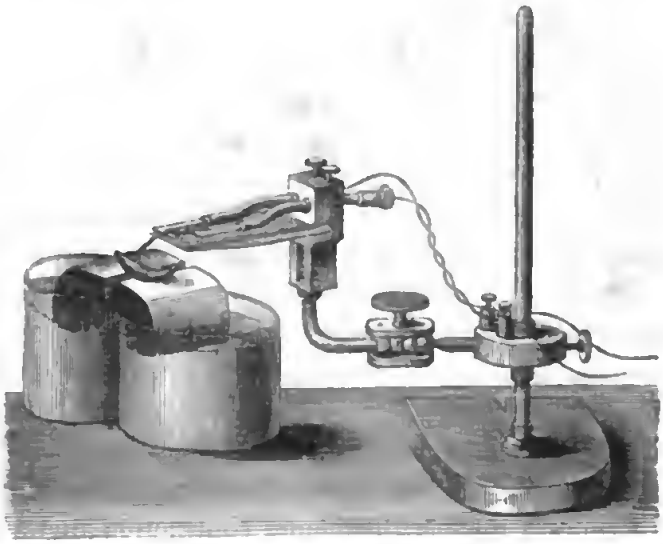


Fig. 339.

ser sur deux petites lames de platine qu'elles réunissent comme un pont et qui, recourbées à angle droit, sont soudées par une de leurs extrémités chacune à une tige de laiton ; ces tiges traversent à frottement juste une pièce d'ivoire qui sert à les isoler et à les fixer en même temps, et elles sont susceptibles d'être mises en mouvement, de façon qu'on puisse disposer les lames suivant les besoins de l'expérience et en particulier comme elles sont disposées dans la figure. Des fils conducteurs communiquant avec les tiges permettent de mettre la portion du nerf comprise entre les deux lames de platine dans le circuit d'un courant électrique d'une nature quelconque. Une petite plaque de verre sur laquelle reposent les lames de platine sert à préve-

nir tout contact possible entre les lames et le muscle gastrocnémien.

Le courant dont M. Dubois-Reymond fit usage dans les expériences dont il s'agit était un courant d'induction produit dans un des fils d'une bobine en faisant passer par intermittence dans l'autre fil le courant d'un couple de Grove très-faiblement chargé. Le passage de ces courants induits à travers la portion du nerf comprise entre les deux lames de platine détermine dans le muscle une contraction tétanique qui est accompagnée d'un changement subit dans la direction du courant musculaire, puis d'une oscillation de l'aiguille qui ne peut se fixer à une position d'équilibre tant que dure l'état tétanique. Cet effet ne tient nullement à une dérivation du courant transmis à travers le nerf, qui vient affecter le galvanomètre; car, outre qu'il est impossible de comprendre cette dérivation dans la disposition de l'expérience, il est facile de s'assurer qu'on n'obtient point le même effet en remplaçant le nerf par un fil ou une bande de papier humectés, plus conducteurs que lui et qui, communiquant avec l'une des extrémités du muscle, sont placés de la même manière, c'est-à-dire comme un pont entre les deux lames de platine. Du reste, le phénomène qu'on observe quand on excite le nerf par le courant électrique se manifeste également, mais seulement d'une manière un peu moins prononcée quand on détermine le tétanos, soit en irritant le nerf par l'action chimique ou mécanique ou par la chaleur, soit en empoisonnant une grenouille par la strychnine.

L'effet que nous venons de signaler ne tient point, comme on pourrait le croire, à la production par la contraction tétanique, d'un courant contraire au courant musculaire naturel, mais simplement à un affaiblissement qui en résulte dans ce courant, affaiblissement qui permet au courant provenant des polarités secondaires de se manifester. Pour le prouver il n'y a qu'à ne pas fermer le circuit du galvanomètre qui accuse la présence du courant musculaire avant que le muscle ait été tétanisé, ce qui fait qu'on évite la production des polarités secondaires; mais si on ferme ce circuit pendant que la contraction tétanique a lieu, alors on obtient un courant dirigé

dans le sens du courant musculaire, mais seulement beaucoup plus faible que lorsque le muscle n'est pas tétanisé. Cet affaiblissement ne provient, ainsi que Dubois-Reymond s'en est assuré par des expériences directes, ni d'une augmentation dans la résistance à la conductibilité, ni d'un défaut de contact avec les coussinets, qui résulterait pour le muscle de son état de tétanisation.

On peut, au lieu d'employer le galvanomètre multiplicateur, se servir, pour apprécier l'influence de la contraction sur le courant musculaire, de la grenouille galvanoscopique. Il est facile même de faire usage des deux espèces de galvanomètres en même temps, en disposant l'expérience comme l'indique la figure 340 dans laquelle U représente la roue destinée à rendre discontinu le courant primaire J produit par le couple Z P pen-

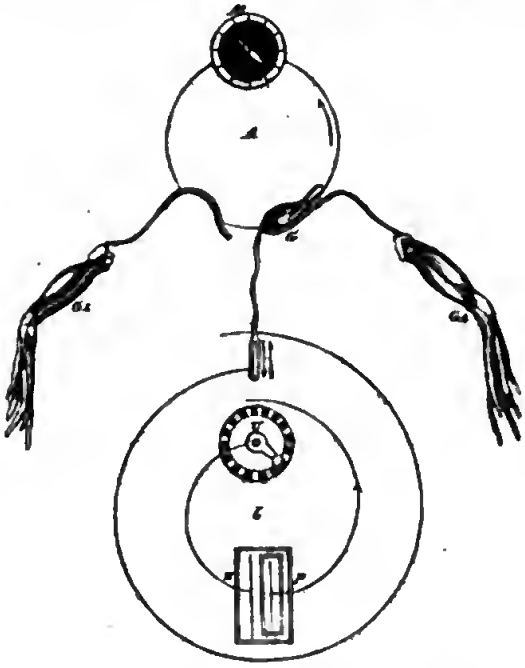


Fig. 340.

dant que le courant induit vient passer à travers le nerf du muscle gastrocnémien G, dont le courant est transmis à travers une portion du nerf d'une grenouille galvanoscopique G_1, et à travers le galvanomètre M. Mais si on veut se passer du galva-

nomètre, on peut appliquer directement sur le muscle gastrocnémien G le nerf de la grenouille galvanoscopique G_2; ce dernier mode d'opérer a été indiqué pour la première fois par M. Matteucci dans la production du phénomène désigné sous le nom de *contraction induite*. Dans le premier mode on voit à la fois la cuisse de la grenouille galvanoscopique se contracter tétaniquement pendant tout le temps que le muscle gastrocnémien est lui-même tétanisé, et le galvanomètre marcher comme dans l'expérience précédente, mais avec moins de force, parce que l'interposition du nerf diminue la conductibilité du circuit. Mais il faut, pour que cette contraction de la grenouille galvanoscopique ait lieu, que le muscle gastrocnémien soit disposé sur les coussinets de manière à donner naissance au courant musculaire ordinaire, c'est-à-dire de façon à ne pas reposer sur eux par des points symétriquement situés des sections longitudinale ou transversale; car dans le cas où ce muscle reposerait par des points symétriques et où par conséquent il n'y aurait pas de courant, sa tétanisation ne déterminerait point de contraction dans celui qui sert de galvanomètre.

Nous avons dit que le mode d'opérer, qui consiste à placer le nerf de la grenouille galvanoscopique en contact avec le muscle gastrocnémien, avait été découvert par M. Matteucci; voici comment il y avait été conduit par la production du phénomène décrit par lui sous le nom de *contraction induite*. Le savant physicien italien, après avoir préparé une grenouille à la manière ordinaire, posait sur les cuisses de cette grenouille, de façon à les unir comme par un pont, le filament nerveux de la grenouille galvanoscopique, en ayant soin que ce filament ne fût pas tendu; puis, faisant passer un courant voltaïque dans les nerfs lombaires de la première grenouille, il opérait une forte contraction dans les muscles de ses cuisses, mais en même temps il voyait se contracter la jambe galvanoscopique, dont le nerf seulement était en contact avec les cuisses de la grenouille en contraction. Cette expérience, répétée en posant le nerf de la grenouille galvanoscopique sur le muscle de la cuisse d'un lapin qu'on faisait également contracter au moyen d'un courant qui traversait son nerf, avait été variée de mille

manières par son auteur. Ainsi il s'était assuré qu'en irritant les nerfs lombaires de la grenouille au moyen d'une pince ou d'un corps quelconque, on obtenait, pourvu que la contraction fût assez forte, la contraction induite dans la grenouille galvanoscopique. Mais on ne la déterminait point en produisant tous les mouvements possibles sur la surface des muscles sur lesquels le nerf était posé, si ces mouvements n'étaient pas des contractions.

Il avait encore remarqué qu'en interposant entre le nerf galvanoscopique et la surface musculaire en contraction une lame d'or ou une lame même très-mince d'un corps isolant, on n'obtenait plus aucun effet, ce qui avait fait soupçonner à M. Becquerel que la contraction induite était due à une décharge électrique émanée de cette surface et traversant le nerf; idée que semblait confirmer le fait que, lorsque le nerf n'est séparé du muscle que par une bande de papier humide, on obtient la contraction induite comme lorsqu'il est immédiatement en contact. Tous ces effets s'expliquent très-bien par des courants dérivés qui ne traversent pas le nerf quand les parties des muscles sur lesquelles ils circulent sont isolées de lui ou réunies par un très-bon conducteur tel qu'une lame d'or. Toutefois M. Matteucci, ayant cru apercevoir que l'interposition de masses liquides, même en apparence les plus isolantes, telles que l'essence de térébenthine[1], n'arrêtait pas comme une lame d'or ou de mica la production du phénomène, n'avait pas cru devoir se prononcer encore sur sa nature d'une manière définitive. Il s'était borné à constater, en opérant sur d'autres animaux encore que la grenouille, tels que des chiens et des

[1] Il est probable que les couches liquides dont se servait M. Matteucci n'étaient pas aussi isolantes qu'il le croyait, parce que le liquide dont elles étaient formées se mélangeaient plus ou moins avec le liquide animal dont le muscle est toujours recouvert; autrement comment s'expliquer que des lames excessivement minces de mica, de sulfate de chaux, de papier collé, de feuilles de végétaux arrêtent l'action, tandis qu'elle n'est pas arrêtée par une couche d'huile ou d'un autre corps liquide isolant? Cette différence entre l'effet de la couche solide et celui de la couche liquide ne peut provenir que de la cause que nous avons indiquée; au reste, c'est ce que M. Dubois-Reymond a démontré par des expériences directes.

lapins, ce fait important, que le phénomène de la contraction induite appartient uniquement au muscle en contraction, et ne provient nullement de l'action du nerf qu'on excite pour opérer cette contraction. Il est vrai que plus tard, et après avoir eu connaissance des recherches de M. Dubois-Reymond, le savant physicien italien avait adopté d'une manière positive, en l'appuyant de quelques observations nouvelles, l'idée qu'il n'avait avancée qu'avec quelque réserve, que la contraction induite pourrait bien tenir à une décharge électrique un peu analogue à celle d'une bouteille de Leyde, s'opérant d'une partie à l'autre d'un muscle en contraction, et de même nature que celle qui a lieu dans les poissons électriques.

M. Dubois-Reymond nous paraît avoir très-bien démontré que la contraction induite, qu'il appelle *secondaire*, n'est que l'une des formes sous lesquelles se manifeste la variation d'intensité qu'éprouve le courant musculaire sous l'influence de la contraction. Il a même réussi, ainsi que M. Matteucci l'a fait également, à exciter dans une troisième grenouille préparée, une contraction identique à celle que la première détermine dans la seconde, en disposant la troisième par rapport à la seconde, comme la seconde l'est par rapport à la première. M. Matteucci a poussé l'expérience jusqu'aux contractions du quatrième ordre, et M. Dubois-Reymond jusqu'à celles du cinquième. Le point essentiel auquel ses recherches précédentes avaient appris à M. Dubois-Reymond à avoir égard, c'est de placer toujours les deux points du nerf de la grenouille qui doit éprouver la contraction musculaire, sur des points aussi dissymétriques que possible du muscle en contraction; on n'obtient aucun effet quand on fait communiquer le nerf avec deux points symétriquement situés.

L'emploi de la grenouille galvanoscopique a sur celui du galvanomètre, dans cet ordre de phénomènes, l'avantage de faire mieux connaître ce qui se passe dans l'action électromotrice du muscle tétanisé. Le mode de contraction qu'éprouve la grenouille galvanoscopique permet d'observer que la contraction des muscles tétanisés, quoique permanente en apparence, ne

l'est pas en réalité, mais qu'elle consiste en une succession très-rapide de contractions simples correspondantes chacune à une diminution et à une augmentation successives du courant musculaire ; tandis que l'aiguille du galvanomètre qui, à cause de son inertie, ne peut suivre toutes ces variations, indique seulement une diminution permanente de ce courant ; diminution qui peut même, lorsque les variations sont très-grandes, se changer en un courant dirigé en sens contraire à cause des polarités secondaires.

On peut se représenter les oscillations qu'éprouve un courant dans un muscle tétanisé, par une courbe dont les abscisses étant proportionnelles au temps, sont excessivement petites par rapport aux ordonnées qui sont proportionnelles à la force du courant ; d'où résulte qu'elle a la forme d'un peigne dont les dents sont tournées du côté de l'axe des abscisses sans le toucher ; les hauteurs de ces dents représentent elles-mêmes les différences de longueur des ordonnées, soit les différences d'intensité qu'éprouve le courant musculaire entre l'instant de la contraction et celui qui lui succède immédiatement. La modification qu'éprouve la loi du courant musculaire par l'effet de la contraction consiste donc simplement en ce qu'au moment de cet acte, toutes les ordonnées de la courbe des intensités du courant musculaire subissent une réduction de leur grandeur proportionnelle à leur grandeur relative. En d'autres termes, la grandeur de l'action négative qui accompagne le tétanos est proportionnelle à l'intensité primitive du courant musculaire, de sorte que l'action électromotrice négative de la contraction s'observe d'autant plus facilement que l'intensité primitive du courant musculaire est plus considérable. Aussi, si cette intensité est nulle comme lorsqu'on applique les extrémités du galvanomètre à la coupe longitudinale du muscle et à égale distance du milieu, l'aiguille du galvanomètre ne bouge pas, même dans le tétanos le plus actif. Cette loi est très-importante, et on voit que pour la découvrir, il ne suffisait pas de faire subir au muscle une contraction unique, mais qu'il fallait le faire entrer en tétanos, afin de prolonger sur l'aiguille l'action électromotrice quelconque positive ou négative qu'on devait

soupçonner émaner du muscle à l'instant de sa contraction.

Un fait bien remarquable, c'est que le tétanos secondaire, c'est-à-dire les contractions de la grenouille galvanoscopique, et par conséquent les variations d'intensité qu'elles accusent dans le courant musculaire du muscle tétanisé directement, peuvent être produites en déterminant l'irritation nerveuse par l'intoxication au moyen de la strychnine aussi bien que par le courant électrique discontinu. Cependant il semblerait dans ce cas que la source d'irritation directe n'étant pas intermittente comme lorsque cette source est le courant discontinu, on ne devrait pas obtenir cette succession rapide de contractions qui, comme nous l'avons vu, caractérisent le tétanos. Toutefois le phénomène demeure le même dans les deux cas, et paraît avoir de l'analogie avec les observations faites par quelques physiciens sur la nature intermittente des contractions tétaniques volontaires de leurs muscles.

Parmi les autres influences qui peuvent être exercées sur le courant musculaire, nous indiquerons encore celles du froid et des divers milieux, qu'a étudiées M. Matteucci. Quant au froid, il a remarqué qu'une grenouille préparée ne donnait plus de contractions propres, ni de déviations au galvanomètre, quand elle avait été entourée de glace pendant quelques minutes, mais qu'elle commençait à en redonner quand, après l'avoir retirée de la glace, on la mettait pendant quelques instants dans de l'eau de 15° à 20°. En ce qui concerne l'influence des milieux, il a trouvé, en opérant sur des piles faites avec les cuisses de grenouilles, que, sauf l'hydrogène sulfuré et le gaz nitreux, la plupart des autres gaz n'influent en rien sur l'intensité et la durée du courant musculaire. A la suite de recherches plus récentes, le savant physicien italien a constaté un fait qui avait été déja signalé par deux autres physiologistes, savoir, que les muscles de grenouilles récemment préparées donnent lieu à une absorption d'oxygène et à une exhalation d'acide carbonique, et quelquefois même à une exhalation d'azote. Mais ce que M. Matteucci a reconnu le premier, c'est que pendant la contraction musculaire l'absorption de l'oxygène et l'exhalation de l'acide carbonique augmentent d'une quantité supérieure au double de l'absorption

et de l'exhalation observées dans les mêmes conditions pour les muscles en repos. Il est également conduit à conclure de ses recherches, qu'en même temps que la respiration devient plus active au moment de la contraction musculaire, il y a dégagement de chaleur et d'électricité dans les muscles; ce qui le confirme dans son opinion que ces dégagements sont, l'un comme l'autre, liés avec les phénomènes électriques de la respiration musculaire, et par conséquent ont une cause inhérente à la fibre musculaire à l'état de vie. Allant plus loin, il essaye, en calculant la quantité de travail mécanique dû à l'excès d'oxygène consommé par les muscles en contraction, de la comparer à celle du travail musculaire effectif trouvé par l'expérience, et il trouve pour dix muscles gastrocnéniens de la grenouille, 0,298 kilogramètres pour le travail calculé, et 0,262 pour le travail effectif. Ce rapprochement entre la machine animale et la machine à vapeur, qui a pour base la théorie récente de l'équivalent mécanique de la chaleur, nous paraît un peu forcé en ce qu'il existe dans l'une des machines et non dans l'autre un principe, savoir le principe vital, dont l'influence doit rendre toute comparaison bien difficile. Ajoutons que M. Matteucci estime que ces expériences prouvent d'une manière positive que l'action chimique de la respiration musculaire pendant la contraction engendre la force développée dans les muscles, et que probablement cette action chimique se transforme d'abord en électricité pour produire la contraction. Du reste, il admet que dans les machines animales, comme dans celles qui sont régies par la chaleur ou par l'électricité, la production de la force est soumise aux mêmes lois. Nous reviendrons sur ce point quand nous nous occuperons de la force nerveuse.

Dans tout ce qui précède, nous avons étudié l'électricité musculaire et les causes qui la modifient sur des muscles détachés ou appartenant à des animaux récemment tués ou du moins mutilés. M. Matteucci avait déjà fait quelques essais pour constater chez des grenouilles vivantes les phénomènes qu'il avait observés chez les grenouilles privées de la vie; mais l'animal n'était pas intact; il était toujours blessé en quelques points. On doit à M. Dubois-Reymond d'avoir réussi à constater les phé-

nomènes de l'électricité musculaire dans des animaux vivants et en particulier chez l'homme.

Le courant musculaire de la grenouille est facile à observer sur l'animal vivant, mais écorché; en effet si on laisse la peau sur ses muscles on trouve des résultats anormaux qui tiennent soit à ce que la peau conduit le courant musculaire, soit à ce qu'elle paraît posséder une force électromotrice propre; pour que le courant musculaire se montre dans toute son intensité, il faut que l'eau salée soit en contact avec la surface naturelle du muscle. Il existe même, indépendamment de la peau, sur la surface de tous les muscles de la grenouille une couche superficielle qui agit plus ou moins énergiquement, suivant chaque muscle en particulier, en sens contraire de la force électromotrice du courant musculaire, et que par cette raison M. Dubois-Reymond appelle *parélectronomique*, pour indiquer qu'elle s'oppose à la manifestation des lois de l'électricité musculaire. Il en résulte que si on fait communiquer un muscle au galvanomètre par sa coupe transversale et sa coupe longitudinale naturelles, le courant observé est quelquefois intense, mais le plus souvent très-faible, ou même de sens contraire au sens du courant musculaire naturel. L'abaissement de température, en faisant disparaître le courant musculaire, fait dominer le courant inverse dû à la couche parélectronomique. Cet état du muscle, appelé également état perélectronomique, disparaît immédiatement, et le courant musculaire normal se manifeste si on enlève la couche parélectronomique, si on la mouille d'eau salée ou si on la détruit par le contact d'un morceau de porcelaine fortement chauffé. Les muscles des mammifères, des oiseaux et des poissons présentent la même propriété. Pour observer le courant musculaire dans l'animal vivant, il faut donc se mettre à l'abri de cette cause d'erreur, et pour cela il suffit d'humecter d'eau salée les points de la peau de la grenouille, par exemple, qui doivent être mis en rapport avec le galvanomètre par l'intermédiaire des coussinets humides.

La manière de manifester l'existence du courant musculaire dans l'homme est plus difficile. Il faut d'abord un galvanomètre excessivement sensible (M. Dubois-Reymond en employait un

de 27,000 tours), à cause de la grande résistance que présente le corps humain, résistance dont nous avons déjà vu une valeur approximative[1], mais qui diminue beaucoup lorsque l'épiderme est enlevé dans la portion du corps mise en communication avec l'eau salée qui ferme le circuit. Ce n'est pas tout; M. Dubois-Reymond a trouvé encore des causes d'erreur à éliminer dans les courants qui peuvent provenir de l'action de la peau aux points de contact, de l'inégalité de température, du défaut de simultanéité dans l'établissement du contact des deux points mis dans le circuit, enfin de la tension de la peau variable suivant la disposition du membre touché, état tout à fait indépendant de la contraction. Ces quatre causes agissent aussi bien quand on touche deux points non symétriques pour percevoir le courant musculaire, que quand on touche deux points symétriques qui ne peuvent point donner de courant musculaire. Enfin, à ces quatre causes s'en joint une qui avait été signalée par M. Becquerel, et que M. Dubois-Reymond a trouvé effectivement être très-énergique, c'est l'inégale transpiration des points de la peau mis en communication avec le galvanomètre.

Après avoir analysé avec soin toutes ces sources d'électricité afin de pouvoir les éliminer ou en tenir compte, M. Dubois-Reymond a trouvé que la manière la plus sûre de démontrer l'existence du courant musculaire chez l'homme vivant, était non de le percevoir directement, ce qui est presque impossible, mais de le faire manifester par l'influence qu'exerce sur lui la contraction, influence que nous avons étudiée avec soin dans ce paragraphe. Voici comment il faut alors opérer. L'observateur plonge les doigts de ses deux mains dans deux vases pleins d'eau salée communiquant avec le galvanomètre par l'intermédiaire de deux lames de platine dépourvues de toute force électromotrice. Quand l'aiguille est devenue bien tranquille, il contracte aussi fortement que possible tous les muscles de l'un des bras, en ayant soin que cette contraction n'amène aucun mouvement des doigts plongés dans le liquide. A cet instant l'aiguille du galvanomètre éprouve une impulsion dont l'in-

[1] Tome II, pages 429 et suivantes.

tensité dépend de la force et de l'adresse de l'observateur, mais dont la direction invariable indique que le courant chemine dans le bras contracté de la main vers l'épaule. Cet effet ne peut être attribué qu'à la variation négative, soit diminution qu'éprouvent les courants du bras contracté, d'où résulte que le courant du bras resté en repos l'emporte; car auparavant quand les deux bras étaient en repos, leurs courants musculaires se détruisaient par raison de symétrie. Ainsi le courant musculaire naturel des bras cheminerait dans chacun d'eux de l'épaule vers la main.

Le résultat de l'expérience est le même, quelle que soit la dissolution conductrice par laquelle on remplace l'eau salée, ce qui prouve que l'effet ne peut pas être attribué à une action particulière de liquides sur la surface de la peau. Il est facile également de s'assurer que l'agitation du liquide et les petits mouvements de la main sont sans influence. L'élévation de température qui résulterait de la contraction du bras est trop faible pour expliquer la production du courant, qui d'ailleurs devrait être dirigé en sens contraire s'il provenait de cette cause. M. Dubois-Reymond a également montré qu'il n'est pas dû à une congestion sanguine provenant de la contraction, car en en provoquant une directement même beaucoup plus forte que celle qui accompagne la contraction, on n'a aucun effet. Enfin restait une objection faite par M. Becquerel et qui consiste à expliquer la production du courant par une transpiration subite du membre contracté; mais cette cause, ainsi que cela résulte de l'analyse qu'en a faite M. Dubois-Reymond, donnerait un courant dirigé dans un sens contraire à celui qui se manifeste. Quant au fait signalé par M. Becquerel que l'on obtient encore un courant plus faible il est vrai, quand on contracte le bras avant de le mettre dans le circuit et qu'on ne plonge les mains dans les vases de communication que quelques instants après que la contraction a cessé, M. Dubois-Reymond démontre qu'il n'est pas contraire à l'hypothèse qui attribue néanmoins le courant à l'effet de la contraction musculaire. Car il a remarqué que la variation négative du courant musculaire persiste dans les muscles des animaux quelque temps après que

la contraction a cessé; et cette persistance doit avoir lieu chez l'homme comme chez les animaux. On peut d'ailleurs le prouver directement en observant que si, après avoir fait dévier l'aiguille du galvanomètre par la contraction des muscles d'un bras, on laisse ces muscles revenir à l'état naturel, l'aiguille ne revient au zéro qu'avec une extrême lenteur.

On a objecté contre les conclusions de M. Dubois-Reymond que lorsqu'on fait avec la grenouille une expérience semblable à celle qui montre l'existence du courant musculaire dans l'homme, on obtient un effet inverse. En effet, si l'on place une grenouille à cheval par ses muscles inférieurs sur les vases de communication, on n'aperçoit d'abord aucun courant, mais si l'on fait contracter un de ses muscles après avoir coupé l'un des nerfs sciatiques pour paralyser l'autre, le galvanomètre accuse un courant qui est descendant dans le muscle contracté, tandis qu'il est ascendant dans le muscle contracté de l'homme; aussi bien quand les muscles qui servent à former le circuit sont ceux des pieds que lorsque ce sont ceux des bras. Cette différence tient très-propablement à la différence si grande qui existe dans la forme et les dispositions des masses musculaires chez l'homme et chez la grenouille. Au reste, on peut reconnaître une semblable opposition dans les résultats chez les animaux eux-mêmes. Ainsi les choses se passent chez le lapin comme chez l'homme, et cependant les lois du courant musculaire sont les mêmes chez le lapin que chez la grenouille et les autres animaux. Mais le fait est qu'il existe dans la disposition des muscles de la grenouille, du lapin et de l'homme une différence importante qui explique peut-être la différence des résultats. Dans la grenouille, à l'extrémité supérieure du muscle gastrocnémien, la coupe transversale naturelle est comme ensevelie dans la masse du muscle, ce qui fait que ce muscle ne peut donner à l'état de repos qu'un courant ascendant; tandis que dans l'homme et dans le lapin la masse musculaire qui correspond au gastrocnémien de la grenouille, se termine à sa partie supérieure par des aponévroses parfaitement libres, ce qui fait que dans l'état de repos le muscle peut produire un courant descendant dans le circuit extérieur.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans indiquer un moyen que M. Dubois-Reymond a employé pour augmenter considérablement le courant produit par la contraction volontaire des muscles, et qui consiste à enlever l'épiderme au moyen de vésicatoires appliqués au bras, et de mettre ces plaies artificielles en communication avec le galvanomètre. De cette manière il a obtenu un courant de 60 à 70°, tandis qu'en faisant communiquer le galvanomètre avec les mêmes points de la peau demeurés instacts, il ne produisait qu'une déviation de 2 à 3° par la même contraction d'un bras; ce qui prouve que la présence de l'épiderme occasionne la plus forte des résistances qui s'opposent à la manifestation des courants de l'organisme humain.

§ 4. Du courant nerveux.

Le rôle des nerfs dans la production de l'électricité animale, envisagé dans l'origine comme très-important, avait paru plus tard, à la suite des recherches multipliées de M. Matteucci, se réduire à celui de corps simplement conducteurs et participant à l'état électrique de la partie du muscle à laquelle ils étaient liés. Nous avons déjà vu que, même sous le rapport de la conductibilité, la substance nerveuse est très-inférieure au tissu musculaire[1], quoique le nerf proprement dit soit un peu meilleur conducteur que la substance cérébrale. Mais M. Dubois-Reymond a réussi à démontrer au moyen d'expériences faites avec soin et à l'abri de toute objection, qu'il existe dans les nerfs comme dans les muscles des animaux vivants ou récemment morts, des courants électriques parfaitement déterminés. Il suffit, pour cette démonstration, de prendre un fragment tout récemment enlevé au nerf ischiatique d'une grenouille, et de le placer sur les coussinets de façon qu'il soit en contact avec eux, d'un côté par sa section longitudinale, de l'autre par une section transversale artificielle (fig. 341), et on obtient aussitôt un courant qui peut aller jusqu'à 25 ou 30°, mais ordinairement

[1] Tome II, page 453.

seulement jusqu'à 15 ou 18°; ce courant qui finit par produire une déviation constante de 5 à 8° est constamment dirigé,

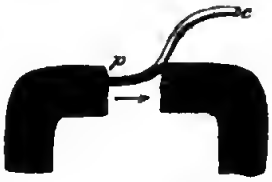


Fig. 341.

Fig. 342.

comme dans le muscle de la section longitudinale à la transversale, à travers le fil du galvanomètre. Il est parfaitement indifférent pour la direction du courant que ce soit l'une ou l'autre des deux sections transversales qui soit en contact avec le coussinet, le courant marche toujours dans le même sens (fig. 342). Si le nerf est mis en communication avec les deux coussinets par ses deux sections transversales également en étant soutenu sur une petite plaque de verre (fig. 343), l'aiguille du galvanomètre ne se meut pas; ou si elle manifeste quelques légères déviations soit dans un sens, soit dans un autre, cela tient à la difficulté qu'il y a à ne toucher les coussinets que par la section transversale seule, en évitant tout contact de la section longi-

Fig. 343.

Fig. 344.

tudinale. La petitesse de la section transversale empêche qu'on puisse étudier les différences d'action électromotrice de ses différents points, mais il n'en est pas de même pour la section longitudinale; il est facile, comme pour les muscles, de mettre en contact avec les coussinets deux points non symétriques de cette section, et on obtient alors (fig. 344) un courant beaucoup plus faible il est vrai que lorsque le circuit est fermé par les sections transversale et longitudinale, mais qui pourtant produit une impulsion de 6 à 7° et une déviation constante de

2 à 4°. Le sens du courant indique que les points rapprochés du milieu du fragment nerveux sont positifs par rapport à ceux qui sont plus voisins des extrémités. Quand les deux points de la section longitudinale sont à égale distance du milieu, il n'y a aucun courant.

Les phénomènes électriques que nous venons de décrire sont les mêmes dans les nerfs quelle que soit leur nature, aussi bien dans les nerfs du sentiment que dans les nerfs du mouvement, dans les racines antérieures que dans les postérieures, dans les centres nerveux mixtes que dans les simples. Le nerf optique de la grenouille étant trop petit pour ce genre d'expérience, M. Dubois-Reymond a pris celui d'un poisson, de la tanche par exemple, et il a obtenu un courant de 40 à 45° dirigé toujours de la section longitudinale à la transversale à travers le fil du galvanomètre, dans le cerveau qui ne présente pas de section longitudinale proprement dite, c'est toute section artificielle qui est négative par rapport aux points de la surface naturelle, laquelle joue le même rôle que la section longitudinale. Ajoutons que, de même que lorsqu'il s'agit du courant musculaire, les nerfs de l'homme et des animaux des diverses classes présentent tous les mêmes phénomènes.

M. Dubois-Reymond a réussi à percevoir le courant nerveux au moyen de la grenouille galvanoscopique aussi bien qu'en employant le galvanomètre multiplicateur. Il suffit en effet de mettre le nerf de la grenouille galvanoscopique dans le circuit du courant nerveux en employant un coussinet auxiliaire placé entre les deux autres, pour voir la grenouille se contracter par l'effet de ce courant, dans les mêmes cas où l'aiguille du galvanomètre est déviée.

Ainsi le courant nerveux est soumis aux mêmes lois que le courant musculaire; nous pouvons donc assimiler ces deux courants et considérer le premier comme étant, aussi bien que le second, une dérivation du courant qui s'établit dans les nerfs et dans les conducteurs dont il est entouré, par l'effet de la polarité électrique des particules nerveuses et de la disposition qu'elles affectent sous l'influence de la force vitale. Quant à la puissance électromotrice des particules nerveuses compa-

rée à celle des particules musculaires, il est difficile de l'apprécier, mais on peut affirmer qu'à circonstances égales le courant nerveux n'est nullement inférieur en force au courant musculaire.

Il est important maintenant de savoir ce que devient le courant nerveux quand le nerf est mis dans cet état particulier qui le rend propre à transporter aux muscles ou aux centres nerveux ces modifications que nous percevons sous forme de mouvement ou de sensation. La première chose à faire, c'est de trouver un moyen de mettre le nerf dans un état analogue à celui qui représente dans le muscle la tétanisation ; cet état est pour le nerf de mouvement évidemment celui qui produit le tétanos dans le muscle correspondant, et pour le nerf de sentiment celui qui produit la sensation la plus vive possible de quelque nature qu'elle soit. Nous appellerons *tétaniser* le nerf le mettre dans cet état, et pour le tétaniser nous avons vu que le moyen le plus simple est de faire passer dans une partie de sa longueur une série de courants interrompus.

Mais, avant d'examiner l'effet de la tétanisation, il est nécessaire d'étudier celui qui résulte du passage de courants constants à travers le fragment nerveux. Pour cela il suffit de placer le nerf (fig. 345) de manière qu'il soit en contact par sa section transversale avec l'un des coussinets et par sa section longitudinale avec l'autre, pendant que son prolongement va reposer sur les deux lames de platine, de façon à ce que la portion comprise entre ces lames soit traversée par un courant constant auquel elles servent d'électrodes. Si le courant de la pile a une direction semblable à celle du courant nerveux qui circule entre les deux coussinets, on voit aussitôt celui-ci augmenter d'intensité; il diminue si la direction des deux courants est inverse. Ces variations se maintiennent aussi longtemps que le prolongement du nerf est traversé par le courant voltaïque; elles cessent aussitôt que celui-ci est interrompu. Il résulte donc

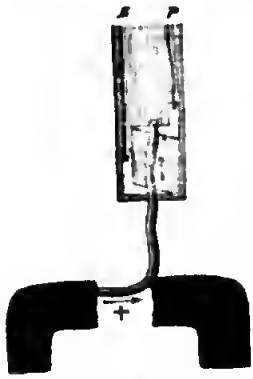


Fig. 345.

évidemment de la circulation dans une partie du nerf de ce courant étranger, une altération dans tout le nerf lui-même, et c'est cette altération que Dubois-Reymond a désignée sous le nom d'*état électrotonique* du nerf. Il distingue deux phases différentes dans cet état électrotonique, celle pendant laquelle le courant nerveux éprouve une augmentation d'intensité et qu'il appelle *positive*, celle pendant laquelle il éprouve une diminution et qu'il appelle *négative*.

On peut déterminer les deux phases en même temps dans le même nerf en faisant passer le courant artificiel dans une portion prise au milieu de sa longueur, et en faisant aboutir chacune de ses extrémités à deux systèmes de coussinets réunis chacun séparément par un galvanomètre au moyen d'un arrangement semblable à celui que représente la figure 345 pour une seule des extrémités du nerf. On voit alors par l'effet du même courant voltaïque, celui des deux courants nerveux qui va dans le même sens que le courant artificiel augmenter d'intensité, pendant que l'autre qui va en sens contraire est affaibli.

Ajoutons que les phénomènes sont d'autant plus prononcés que l'intervalle qui sépare la portion du nerf placée dans le circuit du courant extérieur de la portion qui est dans le circuit du galvanomètre, est plus petit, que le courant extérieur lui-même est plus fort, et que la portion du nerf soumise directement à son action est plus longue.

Il résulte de l'étude du phénomène que nous venons de décrire et des circonstances qui le favorisent, qu'on peut s'en rendre compte en supposant que l'état électrotonique qu'affecte le nerf est dû à une polarisation moléculaire du nerf analogue à celle qui est déterminée dans tous les corps conducteurs par l'effet du passage d'un courant électrique. Cette polarisation consiste en ce que les molécules nerveuses, douées naturellement, comme celles du muscle, de deux pôles électriques, tournent toutes leurs pôles positifs du côté vers lequel se dirige le courant, et leurs négatifs du côté d'où il vient. Il faut seulement admettre que cette action polarisante peut s'étendre avec une intensité décroissante, il est vrai, jusqu'aux portions du

nerf qui sont en dehors du circuit du courant artificiel. Cette explication, que nous empruntons à M. Dubois-Reymond, n'exige point qu'on doive admettre, avec ce physicien, dans le nerf pas plus que dans le muscle, l'existence de molécules péripolaires qu'il suppose être formées dans le nerf, chacune de la juxtaposition de deux molécules bipolaires. Nous estimons qu'il est suffisant de supposer que ces molécules sont bipolaires, et que, sous l'influence du principe vital, elles sont dans le nerf comme dans le muscle disposées de manière que leurs pôles positifs soient tournés extérieurement et leurs négatifs intérieurement. Cette disposition explique pour le nerf de la même manière que pour le muscle, la manifestation d'un courant propre, appelé dans ce cas courant nerveux, qui a lieu quand on fait communiquer une section transversale du nerf avec une section longitudinale. Mais, sous l'influence du courant extérieur, les molécules nerveuses plus mobiles que celles des muscles peuvent, en partie du moins, se disposer les unes à la suite des autres suivant le mode désigné sous le nom de polarisation, et affecter cette disposition même dans les portions du nerf non traversées directement par le courant. Il en résulte la circulation dans le nerf d'un courant nouveau qui doit augmenter ou diminuer, suivant sa direction, le courant nerveux lui-même.

Si le courant qu'on fait passer par le fragment du nerf placé entre les deux lames de platine, au lieu d'être continu, est discontinu et encore mieux dirigé alternativement en sens contraire, cas dans lesquels la tétanisation est produite, la partie du nerf placée dans le circuit du galvanomètre éprouve une diminution dans son propre courant, quelle que soit la direction du courant extérieur, tandis qu'avec le courant continu il y a augmentation quand le courant va dans un sens, et diminution quand il va dans l'autre. L'effet de la tétanisation est par conséquent le même pour le nerf que pour le muscle. Mais il importe de savoir si cet effet a encore lieu quand on tétanise le nerf autrement que par la voie électrique; M. Dubois-Reymond a réussi à constater qu'il en est ainsi, et pour cela il a été obligé d'employer un galvanomètre de 24,160 tours. Au moyen de

cet instrument si sensible et par conséquent si difficile à manier, il a obtenu une oscillation négative du courant nerveux en opérant sur le nerf d'une grenouille empoisonnée par la strychnine, nerf qu'il avait mis à nu depuis le jarret jusqu'à la colonne vertébrale et qui se trouvait tétanisé par l'effet du poison. On obtient également une oscillation négative du courant nerveux, mais de 1° à 3° seulement, en brûlant, en meurtrissant l'extrémité libre d'un nerf placé entre les coussinets, comme il est disposé dans les figures 341 et 342.

Pour savoir si l'oscillation négative du courant nerveux, que produit la tétanisation, est continue ou interrompue comme dans le muscle, il est nécessaire de substituer au galvanomètre multiplicateur le galvanomètre physiologique. Dans ce but on place sur les lames de platine de l'appareil de la figure 345 un fragment de nerf dont le reste vient reposer sur une lame de verre bien sèche, puis l'on ferme le circuit en unissant, au moyen d'une portion du nerf de la grenouille galvanoscopique, la section transversale et la section longitudinale du premier nerf; on transmet à travers ce nerf un courant rendu discontinu au moyen d'une roue dentée mise dans le circuit d'un couple de Grove, et on obtient la contraction secondaire dans la grenouille galvanoscopique. Afin de déterminer si cet effet provient de la variation négative du courant nerveux dans le nerf traversé par le courant artificiel, comme lorsqu'il s'agit du muscle, ou simplement de l'apparition ou de la disparition successives dans ce nerf de l'état électrotonique, M. Dubois-Reymond a tenté avec succès d'obtenir la contraction secondaire en posant simplement à côté l'une de l'autre les extrémités du nerf excité par le courant et du nerf de la grenouille galvanoscopique (fig. 346). Il n'est donc pas nécessaire que le nerf excité soit en contact avec l'autre par la section longitudinale et la section transversale en même temps, ce qui semble indiquer que la contraction secondaire

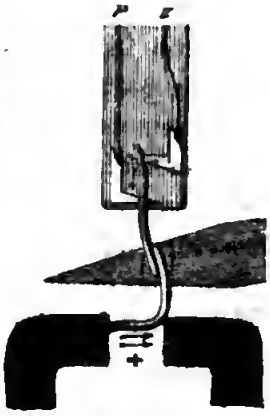


Fig. 346.

ne tient effectivement pas à la variation négative du courant nerveux; mais bien aux oscillations de l'état électrotonique. Ce qui confirme cette conclusion, c'est que pour obtenir la contraction secondaire, il ne faut pas que la portion du nerf principal qui est à côté de celui de la grenouille galvanoscopique soit trop éloignée de la portion soumise directement à l'action du courant extérieur, et il est nécessaire que la tétanisation soit produite par voie électrique.

Il y a donc une différence importante entre les muscles et les nerfs quant à la cause de la contraction secondaire qui résulte de leur tétanisation, l'effet étant produit dans les premiers par la variation négative du courant musculaire qui accompagne la contraction et étant indépendant de la cause de cette contraction, tandis que dans les nerfs il est lié avec l'apparition et la cessation de l'état électrotonique, et par conséquent dépendant du mode employé pour les exciter; mode qui doit être un courant électrique. On ne peut donc décider par les expériences qui précèdent la question de savoir si la variation négative est continue ou intermittente.

M. Dubois-Reymond a réussi à démontrer, en disposant l'expérience comme l'indique la figure 346, que l'état électrotonique du nerf excité directement détermine aussi dans le nerf contigu un état électrotonique, mais inverse du sien propre. Il a même réussi à produire l'état électrotonique dans un nerf par l'effet de son propre courant; dans ce but, après avoir disposé le nerf comme l'indique la figure 341, il a relié l'extrémité libre en anneau de façon que la section transversale *c* fût en contact avec une partie de la section longitudinale située en dehors des coussinets; il en est résulté un courant circulant dans la partie du nerf repliée en anneau, et un état électrotonique accusé par le changement d'intensité du courant dans la portion comprise entre les deux coussinets.

Toutes les expériences relatives au courant nerveux ont été répétées sur des nerfs de nature différente, et on s'est assuré qu'il n'existait aucune différence entre eux, quant aux effets observés, qu'à cet égard les nerfs du mouvement et les nerfs du sentiment se conduisent de la même manière; cette observa-

tion a permis de résoudre la question de savoir si dans chaque classe de nerf l'irritation n'est propagée que dans une direction, de haut en bas dans les nerfs du mouvement, et de bas en haut dans ceux du sentiment, ou si elle peut être propagée dans tous les nerfs dans les deux directions opposées également. En effet, la question ne peut être résolue que de la seconde manière, une fois qu'il est démontré que, quelle que soit la portion d'un nerf quelconque qu'on tétanise, il se manifeste une variation négative du courant nerveux dans le reste du nerf, preuve que l'irritation se propage dans tous les sens également.

Une dernière observation importante en ce qui concerne l'état électrique des nerfs, est encore due à M. Dubois-Reymond. Il avait remarqué que dans les animaux à sang chaud il arrive quelquefois que la direction de leur courant musculaire est renversée un instant très-court avant le moment où il disparaît tout à fait par l'effet de la perte de la vitalité. Le courant nerveux présente une modification du même genre, quoique non identique, quand on blesse le nerf par des actions soit mécaniques, soit calorifiques, soit chimiques. Ainsi si l'on approche brusquement d'un nerf placé sur les coussinets un fer rouge, mais sans le toucher avec ce fer, on voit le courant nerveux changer rapidement de direction, sans que cependant la propriété du nerf d'agir sur le muscle soit détruite ; si on replace le nerf en contact avec le muscle de manière qu'il recouvre son humidité naturelle, il reprend en même temps son pouvoir électromoteur ordinaire. Cependant il est facile de prouver, par des expériences directes, que ce renversement du courant n'est point dû à une augmentation de résistance dans le nerf, provenant de sa dessiccation par l'effet de la chaleur rayonnante. Une chose remarquable, c'est que lorsque le nerf est dans cet état anormal, toutes les sections transversales qu'on y détermine en le coupant, sont positives au lieu d'être négatives, par rapport à la section longitudinale.

§ 5. Rapprochement entre le courant musculaire et le courant nerveux et conséquences physiologiques.

Nous pouvons maintenant regarder comme démontré d'une

manière péremptoire par les recherches que nous avons exposées : 1° qu'il existe soit dans les muscles, soit dans les nerfs de tous les animaux, une électricité naturelle indépendante des actions mécanique, physique et chimique, soit extérieures, soit intérieures ; 2° que cette électricité se manifeste sous forme de courants fermés circulant le long des muscles ou des nerfs de l'animal, et dont nous ne pouvons percevoir par le secours de nos instruments qu'une portion dérivée très-petite ; 3° que la présence de cette électricité libre est subordonnée à l'état de vie de l'animal et qu'elle disparaît avec la force vitale. Ces points une fois acquis, voici, en résumé, les lois qui régissent les courants musculaires et les courants nerveux ; elles sont les mêmes, sauf en un petit nombre de points assez essentiels, il est vrai, que nous aurons soin de faire ressortir.

1° Dans les nerfs comme dans les muscles il y a un antagonisme électrique entre la section transversale qui est négative, et la longitudinale qui est positive, avec cette légère différence que les nerfs n'ayant pas de section transversale naturelle, il faut les couper pour percevoir leur courant, tandis que ce n'est pas nécessaire pour les muscles qui ont deux sections transversales naturelles. Cependant le pouvoir électromoteur des muscles qui n'ont pas été coupés est quelquefois plus ou moins dissimulé par l'effet de la couche parélectronomique qui exerce une action électromotrice contraire. Cette action se reconnaît en ce qu'elle semble augmenter par l'effet du refroidissement, à cause de la diminution que le froid apporte au courant musculaire, sans altérer celui de la couche parélectronomique.

2° Les lois qui régissent l'état électrique des muscles et des nerfs appartiennent à chacune des plus petites parties dont on peut les supposer formés, c'est-à-dire à leurs éléments.

3° Le pouvoir électromoteur des muscles et des nerfs ne dure après la mort de l'animal auxquels ils appartiennent, ou après qu'ils en ont été séparés, que tant que subsiste leur susceptibilité à être excités ; susceptibilité qui peut disparaître soit graduellement par la cessation des conditions nécessaires à la vie, soit par la privation soudaine de leurs propriétés vitales au moyen de la chaleur, des actions chimiques, etc.

4° On observe une soudaine et grande diminution dans le courant du muscle au moment où l'on détermine la contraction, et dans celui du nerf quand un mouvement ou une sensation sont transmis.

5° La variation négative du courant musculaire n'est pas permanente, lors même que la contraction semble l'être comme dans l'état de tétanos, mais elle se compose d'une succession rapide de simples et soudaines variations d'intensité. Le courant musculaire ne reprend pas immédiatement, mais seulement peu à peu son intensité après que la contraction a cessé.

6° Le nerf diffère du muscle sous le rapport électrique en ce que, lorsqu'il est traversé dans une portion de sa longueur par un courant continu, le nerf tout entier revêt un état électrique que nous avons appelé électrotonique, d'où résulte la production d'un courant qui, suivant sa direction, augmente ou diminue l'effet du courant ordinaire. Cet état électrotonique du nerf qu'on ne peut imprimer aux muscles, est un commencement d'électrolysation, il détermine une contraction soit en naissant, au moment où le circuit est fermé, soit en disparaissant, au moment où le circuit est rompu.

7° Les phénomènes électriques sont identiques dans les nerfs de mouvement et dans ceux de sentiment; les uns comme les autres transmettent l'irritation dans les deux directions également.

Si maintenant nous rapprochons les faits que nous avons décrits dans les divers paragraphes qui précèdent de ceux que nous avons exposés dans le chapitre IV de la quatrième partie de ce traité, intitulés : *Des effets physiologiques de l'électricité*, nous arrivons à des conséquences remarquables.

Nous avions observé que, lorsqu'on agit par un courant sur les nerfs d'un animal vivant, il y a, au commencement de l'expérience, contraction de ses membres inférieurs et manifestation de douleur aussi bien au moment où l'on établit qu'au moment où l'on interrompt le circuit, et cela quelle que soit la direction du courant; mais on ne tarde pas à s'apercevoir, en continuant l'expérience, qu'au bout d'un certain temps d'au-

tant plus court que le courant employé est plus intense, il existe une différence entre les effets, suivant que le courant chemine dans une direction ou dans une autre, et suivant que l'on établit ou que l'on ferme le circuit. Quand le courant qui circule est direct, c'est-à-dire dirigé dans le sens de la ramification du nerf, l'effet en est limité aux contractions des muscles inférieurs au moment où l'on ferme le circuit, et à une contraction des muscles du dos accompagnée d'une manifestation de douleur quand on ouvre le circuit. Avec le courant dirigé en sens inverse, ce sont les contractions des muscles du dos et la manifestation de douleur qui ont lieu quand on ferme le circuit, et la contraction des muscles inférieurs quand on l'ouvre. Il y a donc deux périodes dans l'action du courant sur l'animal vivant, et on peut résumer ce qui les caractérise, en disant que dans la première le courant agit dans tous les sens soit au moment où il est établi, soit au moment où il est interrompu, et que dans la seconde il agit dans le sens de sa direction quand il commence, et dans le sens contraire à sa direction quand il cesse. M. Matteucci a réussi en opérant sur un lapin à confirmer ces résultats déjà signalés par Marianini, comme nous l'avons vu dans le chapitre IV de la quatrième partie.

Avant d'aller plus loin, remarquons que si le courant peut produire avec la douleur des contractions dans les muscles du dos et de la tête, lors même qu'il n'agit pas directement sur un nerf qui se ramifie dans ces muscles, et déterminer ainsi un mouvement par l'excitation électrique du nerf au-dessus de la partie excitée, cela tient à une action appelée *réflexe* ou de réflexion, action qui est due elle-même à ce que l'excitation sensoriale du nerf sur lequel agit le courant détermine la contraction par l'intermédiaire du centre nerveux auquel elle aboutit. C'est ce que M. Matteucci a très-bien démontré en coupant à un lapin soumis à l'expérience, la moelle épinière soit totalement, soit en des points différents. Quand la moelle a été coupée tout à fait à son extrémité, il n'y a plus de contraction sur aucun point supérieur au nerf excité; dans les autres cas, il y en a encore sur ceux des muscles qui sont inférieurs au point où la moelle a été coupée.

Nous ne reviendrons pas sur les différentes phases si bien décrites par Nobili, que présentent l'action du courant direct et celle du courant inverse aux différentes périodes de vitalité du système nerveux, non plus que sur l'altération que détermine dans les propriétés du nerf, la transmission prolongée du courant, altération qui, lorsqu'elle ne cesse pas en même temps que le courant qui l'a provoquée par le simple effet de la force vitale, cède à l'action d'un courant inverse. Tous ces effets sont liés à la constitution même du nerf et aux propriétés qui découlent de cette constitution et dont nous avons fait l'étude dans le § 4 de ce chapitre. L'altération ou l'affaiblissement qu'éprouve l'excitabilité du nerf, quand il est parcouru pendant un certain temps par un courant continu, sont encore plus prononcées quand le courant est discontinu de manière à déterminer la tétanisation; il en résulte que pour faire ensuite contracter la grenouille, il faut un courant plus fort dans le second cas que dans le premier.

La ligature d'un nerf arrête l'action du courant électrique comme celle des autres stimulants; seulement il faut qu'elle soit plus forte quand le stimulant employé est le courant. Lorsque la ligature a été très-serrée, on trouve le nerf, dans les points où il est lié, très-aminci et réduit à son névrilème; alors, en coupant la ligature, on ne parvient plus à exciter de contraction en irritant le nerf au-dessus du point qui a été lié. Les poisons agissent différemment les uns des autres; M. Matteucci a observé que celui qui diminue le plus l'excitabilité du nerf est l'acide hydrocyanique; quant aux narcotiques, tels que l'opium ou la noix vomique, ils ne diminuent l'excitabilité du nerf de la grenouille qu'à la dernière période de l'empoisonnement. M. Matteucci a également remarqué que, lorsque la mort de l'animal a été déterminée par une décharge électrique, l'excitabilité du nerf par le courant électrique cesse entièrement. Mais, dans ce cas comme dans les précédents, les grenouilles ne perdent pas l'irritabilité de la fibre musculaire; le courant électrique y excite des contractions quand il y est appliqué directement.

Une observation très-curieuse de M. Bernard est celle qui se

rapporte à l'action du *curare*[1]; on a deux grenouilles parfaitement semblables; on en empoisonne une en insérant sous sa peau un petit morceau de curare; puis, quand au bout de cinq ou six minutes elle ne donne plus de signes de vie, on retire le morceau de curare et on prépare cette grenouille, ainsi que celle qui n'a pas été empoisonnée, suivant la méthode de Galvani. On fait passer dans une portion du nerf lombaire de chacune d'elles successivement le courant d'une petite pile voltaïque; on voit aussitôt les muscles de celle qui n'a pas été empoisonnée se contracter fortement, tandis qu'on n'aperçoit pas le plus léger signe de contraction dans celle qui a été empoisonnée; mais en appliquant les pôles de la pile sur les muscles, l'une et l'autre éprouvent également une forte contraction, et même la grenouille empoisonnée conserve plus longtemps que l'autre la propriété d'éprouver la contraction musculaire.

Les expériences qui précèdent, en nous montrant la possibilité de déterminer directement la contraction musculaire par l'application de l'électricité aux muscles mêmes, sans l'intervention du nerf, nous appellent à examiner la question importante de savoir si la fibre musculaire est par elle-même, indépendamment de toute action externe portée sur son nerf, capable de se contracter, ou bien s'il faut toujours, pour produire la contraction du muscle, que son nerf ait été irrité d'avance. J. Muller et Longet avaient trouvé que, lorsqu'un nerf a été depuis quelque temps séparé du système nerveux central, il n'excite plus la contraction dans les muscles auxquels il aboutit, lorsqu'on irrite son extrémité libre. M. Matteucci a obtenu le même résultat en agissant sur des grenouilles qui avaient été empoisonnées par une solution d'extrait alcoolique de noix vomique introduite dans leur estomac. Cependant le même courant de huit à dix couples qui, appliqué au nerf sciatique de ces grenouilles, ne produisait aucun effet, déterminait une con-

[1] Le *curare* est un poison remarquable dont les effets ont été étudiés par M. Alvaro Raynoso dans un mémoire communiqué à l'Académie des sciences, et sur lequel M. Flourens a fait un rapport important.

traction dans le muscle soumis à son action. Il y a plus, Humboldt le premier, et bien d'autres après lui, ont réussi à faire contracter, au moyen du courant électrique, des morceaux de substance musculaire pris sur un animal quelconque, auxquels tous les filaments nerveux visibles avaient été enlevés avec le plus grand soin. M. Matteucci, en répétant cette expérience, s'est assuré que cette contraction a lieu au moment où le courant commence à pénétrer dans la masse musculaire et au moment où il cesse de circuler, et cela quelle que soit sa direction relativement à celle des fibres musculaires. Cette contraction, qui ne dure qu'un instant, semble consister dans une espèce de raccourcissement des fibres, et, quoique le circuit reste fermé, la fibre, raccourcie au premier moment, reprend sa forme, et ce n'est que lorsque le circuit est interrompu qu'on la voit de nouveau se contracter, quoique plus faiblement que la première fois. Ainsi le courant électrique seul de tous les excitants essayés peut, quand il est appliqué directement aux muscles, déterminer leur contraction sans l'intervention des filets nerveux.

Ce dernier fait semble établir une analogie remarquable entre la manière d'agir des courants électriques et celle des nerfs, pour produire la contraction musculaire. Un nerf excité par un moyen quelconque, et un courant électrique appliqué directement, agissent de même sur un muscle. N'est-il donc pas probable que c'est par une modification dans son état électrique naturel que le nerf agit quand, en vertu d'une excitation provenant du cerveau ou du muscle, ou d'une cause extérieure, il produit mouvement ou sensation? Essayons de voir s'il nous est possible de nous rendre compte de ce mode d'action.

Nous savons que le nerf a par lui-même un certain état électrique que nous avons réussi à déterminer; nous savons de plus que cet état électrique est modifié par toute excitation exercée sur le nerf. Le muscle a également un état électrique naturel, lequel est modifié toutes les fois qu'il y a contraction. En l'absence d'excitation exercée sur le nerf et de contraction opérée sur le muscle, il doit s'établir nécessairement un certain équilibre électrique, qui consiste dans la circulation de cou-

rants électriques internes en rapport avec les phénomènes chimiques qui s'accomplissent dans le muscle vivant. Nous ne voulons pas dire par là que ces phénomènes soient la cause des courants électriques; la cause en est dans la force vitale qui donne aux molécules organiques, naturellement bipolaires, la disposition nécessaire pour l'établissement de ce courant; mais cette disposition une fois établie, le courant est entretenu par les actions chimiques qui l'accompagnent, et qu'il détermine probablement lui-même en partie[1]. Ainsi la vie est transmise par le nerf au moyen de l'état électrique qu'il possède dans les conditions normales de vitalité, et il en résulte pour le muscle un état électrique analogue avec quelques différences que nous avons fait remarquer et qui tiennent à la nature différente de ces deux parties du corps animal.

Maintenant si, par une cause quelconque, l'état électrique du nerf est modifié, l'équilibre est rompu, et il en résulte une contraction du muscle ou une sensation. Avant d'étudier les conséquences de cette modification, remarquons qu'elle consiste en ce que les molécules organiques dont le nerf est formé ne sont plus polarisées transversalement de dedans en dehors, mais longitudinalement d'une extrémité à l'autre, comme l'est tout corps conducteur traversé par un courant électrique. Quand la modification provient de l'action immédiate du centre nerveux, il paraît que la polarisation s'opère toujours de façon que les pôles négatifs des molécules soient tournés du côté de ce centre, et les positifs du côté du muscle, comme cela résulterait de l'action d'un courant électrique qui cheminerait dans le sens des ramifications nerveuses. C'est ce qui explique pourquoi un courant électrique qui chemine dans ce sens favo-

[1] La force vitale joue ici un rôle analogue à celui de la force qui polarise les molécules d'un liquide électrolytique, quand on y plonge un métal susceptible d'être attaqué par lui; puis, quand le circuit est fermé, le courant lui-même est entretenu par les actions chimiques qui résultent de la fermeture du circuit; celles-ci en même temps augmentent d'intensité. C'est ce qui a lieu également pour les actions chimiques qui constituent la respiration musculaire, puisque, comme M. Matteucci l'a observé, elles sont plus fortes quand le muscle est contracté que quand il ne l'est pas.

rise la contraction bien plus que lorsqu'il chemine dans le sens contraire. C'est également une conséquence naturelle de ce que les particules des nerfs sur lesquelles doit s'exercer l'action immédiate du cerveau étant les intérieures qui y pénètrent plus profondément, celles-ci ont leurs pôles négatifs libres.

Si, au lieu de venir du cerveau, l'action exercée sur le nerf vient du muscle, la polarisation du nerf doit avoir lieu en sens contraire, c'est-à-dire de façon que les pôles positifs soient tous tournés du côté du centre nerveux, et les négatifs du côté du muscle d'où vient l'excitation. Ce renversement dans la polarité des muscles du filet nerveux qui aboutit au cerveau doit l'affecter et y produire une sensation. C'est ce que confirme l'effet d'un courant électrique étranger qui, lorsqu'il circule dans les nerfs dans un sens opposé à celui de leurs ramifications, produit une sensation et non une contraction. On conçoit donc d'après cela que la polarisation s'établisse en sens contraire dans un nerf de mouvement et dans un nerf de sentiment, et que le même nerf ne puisse pas en même temps dans l'état normal transmettre le mouvement et la sensation. Il n'y a que le cas où il est excité dans une partie de sa longueur; il peut alors transmettre le mouvement vers la périphérie et la sensation au centre nerveux, ses deux portions étant polarisées en sens contraire l'une de l'autre. L'effet de la ligature qui, en altérant la constitution musculaire du nerf, arrête la transmission de la cause du mouvement si on la fait au-dessous du point irrité, et celle de la cause de la sensation si c'est au-dessus, s'explique également bien, car alors la polarisation des molécules nerveuses, sous l'action de la cause excitante, ne peut plus s'opérer.

Maintenant comment l'excitation du nerf détermine-t-elle la contraction de la fibre musculaire? Puisqu'on peut déterminer cette contraction par l'application immédiate au muscle d'un courant électrique extérieur, il est évident que le nerf la détermine en modifiant l'état électrique du muscle. Nous avons vu que lorsque le muscle est contracté, son courant propre diminue, ce qui nous paraît tenir évidemment à ce que ses particules changent de place et se disposent les unes à l'égard des autres

de manière que leurs pôles négatifs et positifs soient tournés dans le sens de la longueur comme dans un conducteur traversé par un courant, et non plus dans le sens tranversal. Ce changement de place doit produire un rapprochement des particules dans le sens longitudinal, et par conséquent un raccourcissement de la fibre, ce qui est le caractère de la contraction. Mais ce raccourcissement, et le rapprochement qui en est la cause, ne durent qu'un instant, à cause de l'élasticité propre de la fibre, et les particules se replacent à leur première distance. Cependant il y a une différence importante à noter. Quand la fibre musculaire se contracte par l'effet d'un courant électrique continu appliqué soit à son nerf, soit immédiatement à elle-même, la contraction ne dure, il est vrai, qu'un instant, mais les particules du muscle, tout en reprenant, en vertu de l'élasticité, leur première distance relative, conservent leurs pôles électriques tournés dans le sens de la longueur de la fibre; ce n'est qu'au moment où le courant électrique cesse de circuler que les pôles électriques des particules se replacent dans leur position normale, et ce retour est accompagné d'un nouveau déplacement des particules, et par conséquent d'une nouvelle contraction. Voilà pourquoi il n'y a contraction qu'à l'établissement et à la rupture du courant; parce que ce n'est qu'à ces deux moments qu'il y a demi-révolution des particules du muscle. Quand le courant, au lieu d'être continu, est discontinu, alors il y a une succession si rapide de déplacements et de retours à leur position primitive des particules du muscle, que la contraction semble permanente, ce qui constitue le tétanos; cependant, comme nous l'avons vu au moyen de la grenouille galvanoscopique, la contraction est réellement intermittente.

Reste maintenant à savoir comment il peut résulter d'une modification dans l'état électrique des nerfs que celui des muscles est modifié de manière à produire la contraction. Il faudrait, pour résoudre cette question d'une manière un peu satisfaisante, connaître mieux qu'on ne la connaît, la manière dont les nerfs se terminent, et dont ils se ramifient dans les muscles. Il nous paraît probable que chaque filament nerveux

élémentaire aboutit à une fibre élémentaire[1]; alors il n'est pas étonnant que si ce nerf est polarisé par une cause d'excitation, il détermine la polarisation de la fibre musculaire à laquelle il aboutit. Dans ce cas la fibre entre dans le circuit du nerf, et elle doit éprouver la contraction, comme lorsqu'elle est traversée immédiatement par un courant électrique artificiel. Nous retrouvons alors les mêmes phénomènes, en particulier que la contraction ne dure qu'un instant, à moins que le nerf ne soit tétanisé, ce qui fait que le muscle lui-même l'est aussi. Dans la sensation, c'est le muscle dont l'état électrique normal est troublé, qui polarise le nerf de manière à agir sur le cerveau. Dans les deux cas également, il n'est pas étonnant que tout ce qui altère la contraction moléculaire du nerf empêche sa polarité de s'établir, et par conséquent arrête la transmission du mouvement ou de la sensation. Il serait bien important, pour appuyer ces explications sur des bases plus solides, et pour pouvoir leur donner plus de précision, qu'on parvînt à mieux déterminer qu'on ne l'a fait le mode de communication du nerf et du muscle. Ce qui me paraît éminemment probable, c'est que dans la contraction musculaire, comme dans la transmission de la sensation, l'action réciproque du nerf et du muscle s'opère à l'extrémité même du nerf, et non pas tout le long de son parcours à travers le muscle.

Il résulte de l'étude détaillée que nous venons de faire qu'on peut regarder le corps d'un animal vivant comme le siége d'une multitude innombrable de courants électriques n'ayant la plupart que des circuits locaux; ce sont des portions dérivées de ces courants que nous parvenons à percevoir par l'expérience. Mais, quand par l'effet de la volonté ou d'une autre cause agissant directement sur un nerf, on modifie son état

[1] Le docteur Waller a réussi par la section des nerfs à déterminer dans les filets nerveux qui sont au-dessus de la section une altération qui permet de les suivre dans leurs dernières ramifications avec une grande précision; on les voit ainsi pénétrer jusque dans l'intérieur des fibres musclaires auxquelles elles s'entrecroisent. Nous regrettons que les limites assignées, dans un ouvrage du genre de celui-ci, à cet ordre de considérations, ne nous permettent pas d'entrer dans plus de détails sur les recherches intéressantes du docteur Waller.

électrique, le courant local correspondant se transforme, sinon en totalité, du moins en partie, en un courant dont le circuit plus considérable comprend alors le nerf et le muscle correspondant, et il en résulte les effets que nous avons signalés.

Nous ne quitterons pas ce sujet sans remarquer que nous sommes conduits à admettre que l'agent au moyen duquel s'exerce toute l'action nerveuse est l'électricité, non une électricité créée au moment même où le nerf agit, mais préexistante dans toutes les particules organiques, comme elle préexiste dans toutes les particules de la matière inorganique. Nous sommes de plus forcés d'admettre que, sous l'influence de la vie, ces particules se disposent d'une manière toute spéciale, et qui permet l'accomplissement des fonctions organiques; de sorte que la vie ne peut point être considérée comme une conséquence de la nature électrique et de l'arrangement de ces particules, mais doit au contraire être regardée comme la cause de leur mode de groupement, et par conséquent indirectement des phénomènes qui en résultent. Qu'on ôte la vie, en effet, et les particules, tout en conservant leurs propriétés électriques, c'est-à-dire leur polarité, se groupent tout autrement, de manière à obéir aux conditions d'équilibre des forces qui leur sont propres, et ne présentent plus que les phénomènes ordinaires que nous offre la matière inorganique.

M. Matteucci, tout en reconnaissant que les courants organiques ne sont point dus à une action chimique extérieure quelconque, estime qu'on doit les attribuer aux actions chimiques de l'organisme vivant. Ce serait, suivant lui, dans l'action chimique qui doit exister entre la fibre musculaire proprement dite et le sang artériel en contact avec elle, et par conséquent dans la vie nutritive des tissus, qu'il faudrait chercher la cause de ces courants. Elle serait ainsi inhérente à l'état de vie des tissus organiques, et liée constamment avec une différence dans l'état et dans le pouvoir nutritif de ces tissus, de manière que l'élément positif du couple organique serait toujours représenté par la partie du tissu dont le pouvoir nutritif est le plus fort. Comme on le voit, M. Matteucci est d'accord avec nous en ce point que c'est de la force vitale qu'il fait dépendre en pre-

mière ligne l'électricité animale; seulement, suivant lui, ce n'est qu'indirectement en obligeant la nutrition à s'opérer, que les nerfs intermédiaires entre la force vitale et les muscles développeraient l'électricité; tandis que, suivant nous, l'action serait plus directe, la transmission de l'action vitale des nerfs aux muscles s'opérant par l'électricité même dont les nerfs sont primitivement doués. Nous ne contestons nullement la part de l'action chimique dans la production de l'électricité animale, mais ce n'est pas d'elle que nous faisons découler la première origine de cette électricité que nous croyons, comme nous venons de le dire, être préexistante aux causes qui en déterminent la manifestation, aussi bien dans l'organisme vivant que lorsqu'il s'agit de la matière inorganique.

§ 6. Poissons électriques.

Nous avons déjà indiqué, dans le § 1, qu'il existe une classe d'animaux, les poissons électriques, chez lesquels les signes d'électricité, dont la perception ne peut avoir lieu dans les animaux en général que sous certaines conditions et avec le secours d'instruments très-délicats, se manifestent de la manière la plus prononcée, et de façon à avoir frappé l'attention des observateurs dès les temps les plus reculés. Ces poissons sont au nombre de cinq : la *raya torpelo* (la torpille), le *gymnotus electricus*, le *silurus electricus*, le *tetraodon electricus* et le *trichiurus electricus*. De ces cinq espèces deux seulement ont été étudiées avec soin, la torpille et le gymnote; ce sont les deux dont nous nous occuperons essentiellement dans ce paragraphe.

La torpille ou raie électrique est le plus anciennement connu des poissons électriques, et celui qui a été l'objet du plus grand nombre de recherches, vu qu'il est facile à se procurer, puisqu'il se trouve dans la Méditerranée; son corps, à peu près circulaire, se termine par une queue courte et assez charnue (fig. 347 et 348); l'espace entre les nageoires pectorales, la tête et les branchies, est rempli de chaque côté par un appareil extraordinaire formé de petits tubes membraneux

serrés les uns contre les autres comme des rayons d'abeille, subdivisés par des diaphragmes horizontaux en petites cellules

Fig. 347.

Fig. 348.

pleines de mucosités, et parcourus par les ramifications de nerfs abondants provenant de la huitième paire; c'est dans cet appareil que réside la puissance électrique, comme nous le verrons plus loin. La torpille a été citée de tout temps par les pêcheurs comme donnant volontairement une commotion, soit pour se défendre, soit pour tuer les poissons nécessaires à sa nourriture; mais Musschenbroek est le premier qui ait établi la nature électrique de cette commotion. Walsh avait fait, en 1778, des recherches nombreuses sur cette électricité; il avait remarqué que la commotion est arrêtée par tous les mauvais conducteurs, et qu'on peut par conséquent toucher la torpille impunément avec du verre et de la résine, tandis qu'on reçoit les secousses quand on la touche avec une tige de métal. Il avait réussi à transmettre la décharge à travers un circuit de vingt personnes qui se tenaient par la main, et dont la dernière touchait la torpille sous le ventre, pendant que la première la touchait sur le dos; il en avait conclu que le dos et le bas-

ventre de la torpille ont un état électrique opposé. Gay-Lussac et Humboldt avaient plus tard décrit avec soin les circonstances principales de la décharge de la torpille. Mais le premier travail complet fait sur ce sujet est dû à John Davy, le frère de l'illustre chimiste, qui, en mettant respectivement en contact avec les deux faces de la torpille les deux extrémités d'un fil métallique tourné en hélice ou les deux bouts en platine d'un galvanomètre, était parvenu à aimanter une aiguille d'acier et à dévier l'aiguille du galvanomètre. Il avait également réussi à décomposer l'eau salée, sans pouvoir cependant obtenir des effets de chaleur et de lumière, par le courant de la torpille, dont il avait ainsi déterminé la direction, qu'il avait trouvée être telle que la face supérieure du poisson est positive et l'inférieure négative. MM. Becquerel et Breschet, en confirmant les résultats de Davy, par des expériences faites à Venise en 1835, dans lesquelles ils avaient pris toutes les précautions nécessaires pour se mettre à l'abri de différentes objections qu'on pouvait faire contre la manière d'opérer du savant anglais, avaient établi d'une manière évidente que la décharge de la torpille est bien le résultat d'une décharge électrique analogue à celle de la bouteille de Leyde, et dirigée de la face supérieure à l'inférieure, en même temps qu'ils avaient analysé les circonstances diverses tenant à la position et à l'état de l'animal, qui peuvent influer sur l'intensité de sa décharge. Mais, de tous les physiciens, M. Matteucci est celui qui a fait l'étude la plus détaillée et la plus complète des phénomènes que présente la torpille; aussi ce sont essentiellement ses recherches qui nous guideront dans l'analyse que nous allons faire de ces phénomènes.

La torpille donne ses décharges dans l'air comme dans l'eau; quand on la tient dans la main, les décharges sont si intenses et se succèdent avec une telle rapidité, qu'il est impossible de les supporter; mais l'animal se lasse, et il faut le remettre dans l'eau salée, et lui laisser un certain temps de repos pour que sa fonction électrique se rétablisse. La commotion que lance la torpille est volontaire; on la détermine en irritant l'animal en un point de son corps, mais surtout en lui pinçant les

nageoires; le plus souvent il l'a produit spontanément, soit pour se défendre, soit pour tuer les petits poissons qu'il foudroie ainsi à distance. M. Matteucci a montré l'extrême diffusion de cette décharge dans le liquide où elle a lieu; ainsi, en tenant à la main, dans une grande cuve pleine d'eau salée, et large de $1^{m},50$, et tout près de sa paroi, une torpille vivante, on voit, au moment où elle se décharge, une grenouille préparée, suspendue dans la même eau, mais à l'extrémité opposée, se contracter fortement; preuve qu'une portion de la décharge la traverse. Une pile très-puissante, dans les mêmes circonstances, ne produirait pas le même effet.

La torpille se décharge *quand* elle veut, mais non *où* elle veut; on avait cru par erreur qu'elle pouvait diriger sa décharge, parce qu'on avait ressenti la commotion en touchant la torpille en un point quelconque; il est vrai que si les décharges sont fortes, elles se sentent partout où l'animal est touché; mais quand celui-ci est affaibli, il est facile de voir, en posant des grenouilles préparées sur divers points de son corps, qu'il n'y a que celles qui sont sur les points correspondants à l'organe électrique qui se contractent. Il faut de plus pour que la grenouille, comme tout autre conducteur, soit traversée par la décharge de la torpille, lorsque celle-ci est isolée, qu'elle la touche en deux points différents de son corps; si elle ne la touche que par l'extrémité de son filet nerveux, elle n'éprouve point de contraction; il n'en est plus de même quand la torpille communique avec le sol, la grenouille alors se contracte, parce qu'il s'établit une communication toute naturelle entre un second point de son corps et un second point de la torpille.

M. Matteucci et le père Linari ont réussi à obtenir des effets électriques très-prononcés avec la torpille; ils ont aimanté des aiguilles d'acier comme l'avait déjà fait John Davy; mais le père Linari est de plus parvenu à produire une véritable étincelle électrique entre une surface de mercure communiquant, au moyen d'un fil conducteur, avec l'une des faces de l'organe électrique et un fil de fer communiquant avec l'autre; il a également obtenu une étincelle d'induction, en faisant passer la décharge à travers une hélice électrodynamique. Le père Linari

est donc le premier qui ait tiré une étincelle électrique du corps d'une torpille. Il a aussi, avec l'électricité de la torpille, décomposé le nitrate d'argent et obtenu des effets calorifiques au moyen d'un élément thermo-électrique très-sensible; enfin, il a cherché à mesurer, en employant la balance électro-magnétique de Becquerel, l'intensité des courants électriques produits par la décharge du poisson. M. Matteucci a employé, pour obtenir les signes de décomposition chimique, une bande de papier imbibée d'une solution d'iodure de potassium, au moyen de laquelle il fait communiquer deux lames de platine placées l'une sur le dos, l'autre sur le ventre de l'animal; la nature de la décomposition donne la direction du courant, qui est celle que nous avons déjà indiquée et que confirment les indications plus sensibles d'un galvanomètre. C'est encore M. Matteucci qui a décrit la manière la plus simple et la plus élégante d'obtenir l'étincelle électrique; elle consiste à placer une torpille au moment où on la sort de l'eau sur un disque métallique isolé (fig. 349), en la recouvrant d'un autre disque semblable tenu par un manche isolant; deux tiges en laiton, communiquant chacune respectivement avec un des disques, sont terminées par des boules A et B auxquelles on applique des feuilles d'or suspendues à une distance de demi millimètre l'une de l'autre, et en agitant légèrement le disque supérieur, on irrite l'animal : dans le même moment les feuilles d'or se meuvent, et on voit éclater entre elles des étincelles très-brillantes.

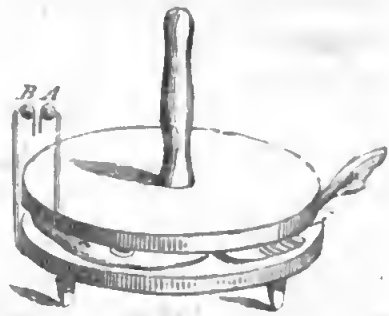


Fig. 349.

Avant de poursuivre l'étude des propriétés électriques de la torpille, il est nécessaire de revenir sur l'organe particulier qui existe chez elle comme chez les autres poissons électriques, et dont nous avons déjà signalé l'existence. Cet organe, appelé par les physiologistes *organe électrique*, n'est point exactement le même chez tous les poissons électriques, comme nous le verrons en nous occupant du gymnote. Il se compose dans la torpille

de deux portions semblables, symétriquement placées de chaque côté de la tête entre les nageoires pectorales et les branchies; elles occupent l'une et l'autre toute l'épaisseur qui sépare les deux plis de la peau. Chacune d'elles est composée d'un grand nombre de prismes d'une forme hexagonale, rangés parallèlement les uns à côté des autres comme les alvéoles d'un rayon de miel, et dont l'une des extrémités repose sur la peau de dessus et l'autre sur celle de dessous (fig. 350); une membrane aponévrotique enveloppe extérieurement tout ce système. Ces prismes sont eux-mêmes formés d'un très-grand nombre de diaphragmes perpendiculaires à l'axe, séparés les uns des autres par de très-petits intervalles remplis d'un liquide d'une nature albumineuse ($\frac{9}{10}$ eau un peu salée et $\frac{1}{10}$ albumine), et présentant ainsi une constitution physique analogue à celle d'une pile. Chaque diaphragme se compose d'une membrane très-mince extrêmement simple et sans structure apparente, d'une épaisseur moyenne d'à peu près 0^{mm}, 004; l'espace qui sépare les diaphragmes les uns des autres et qui est rempli par le liquide albumineux est de 0^{mm}, 016 de largeur environ. On peut calculer d'après ces données que chez une torpille de moyenne grandeur il y a dans chacun des prismes dont se compose son organe, et qui ont 4 centimètres de longueur, 2,000 diaphragmes de 6 à 8 millimètres carrés de surface. Or, comme il y a, d'après Hunter, environ 470 prismes ou piles dans chaque partie de l'organe, cela fait pour l'organe entier 940 piles de 2,000 diaphragmes chacune.

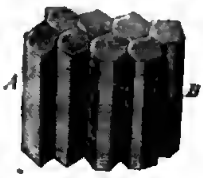


Fig. 350.

A ces détails anatomiques, ajoutons un point essentiel, c'est que quatre faisceaux nerveux d'un grand volume, partant du quatrième lobe du cerveau, viennent se distribuer dans l'organe en ramifications extrêmement nombreuses. Les ramifications terminales des filets nerveux n'aboutissent pas directement aux diaphragmes eux-mêmes comme l'ont cru Savi et Wagner, mais d'après M. Pacini, auquel nous empruntons ces détails, elles se rendent dans le liquide albumineux renfermé entre deux espaces successifs; là elles se subdivisent et s'appliquent sur la

surface inférieure de chaque diaphragme ; les unes se perdent par leur extrémité dans la substance du diaphragme pendant que les autres se terminent à sa surface même ; la surface supérieure des diaphragmes ne reçoit aucune fibre nerveuse. Il résulte de là que les deux surfaces des diaphragmes sont dans des conditions bien différentes d'innervation et par conséquent probablement d'état électrique. Aussi l'expérience nous apprend que les extrémités supérieures des prismes sont toutes positives et les inférieures négatives. Si l'on fait pénétrer dans l'intérieur de l'organe électrique deux lames de platine communiquant avec les extrémités d'un galvanomètre, on obtient au moment de la décharge un courant qui indique que la partie de l'organe la plus rapprochée du ventre est toujours négative par rapport à celle qui est la plus rapprochée du dos, et cela quelle que soit la partie de l'organe où l'on ait inséré les lames de platine.

Examinons maintenant de plus près les circonstances qui peuvent modifier ou déterminer la production de l'électricité dans la torpille. Nous devons remarquer d'abord que l'activité électrique de l'animal est proportionnelle au degré d'intensité de sa circulation et de sa respiration ; c'est ce que prouvent l'influence de la température, du gaz ambiant ; l'action des poisons, surtout celle des narcotiques, détermine plusieurs décharges très-vives avant d'amener la mort de l'animal ; la décharge est encore déterminée par l'action extérieure d'un courant électrique qu'on fait passer de la bouche aux branchies ou à la peau, ainsi que par l'irritation qu'on produit en comprimant la torpille dans différents points du corps. Mais de toutes les circonstances les plus importantes à étudier, ce sont celles qui agissent directement sur l'organe électrique lui-même et sur les nerfs qui y aboutissent.

Pour détruire la fonction électrique de l'organe en agissant sur sa substance seule, il faut, après avoir enlevé la peau supérieure qui le recouvre, l'humecter avec de l'acide sulfurique ou le mettre en contact avec de l'eau bouillante. Au premier moment on a des décharges très-fortes ; puis, au bout de quelques instants, la substance de l'organe blanchit et se coagule, et on ne peut plus en tirer de nouvelles décharges. Ainsi la coagula-

tion de l'albumine de l'organe détruit sa fonction électrique de quelque manière qu'on détermine cette coagulation. D'un autre côté, on peut couper l'organe lui-même soit horizontalement, soit verticalement, et introduire une lame de verre pour séparer les tranches coupées, sans que la décharge cesse d'avoir lieu, tant que l'albumine n'a pas été coagulée.

Galvani et Spallanzani avaient déjà observé qu'en coupant les nerfs qui aboutissent à l'un des organes, la décharge cesse du côté où est cet organe, tandis qu'elle continue du côté opposé. M. Matteucci a reconnu qu'il faut pour détruire entièrement la décharge couper tous les quatre nerfs, et non pas seulement un, deux ou trois. Quand on a coupé deux ou trois nerfs, la décharge se limite aux points de l'organe dans lesquels se trouvent les ramifications du nerf qu'on a laissé intact. Il n'est point nécessaire de couper les nerfs pour détruire la décharge électrique; il suffit de les lier, et on observe les mêmes phénomènes. On peut, lorsque la torpille est bien vivace, obtenir quelques décharges électriques, lors même que les nerfs ont été coupés, en tirant avec une pince un des filets nerveux qui sont attachés à l'organe; et même en détachant l'organe avec ses quatre nerfs après qu'ils ont été séparés du centre nerveux, on observe des signes électriques en irritant tantôt un nerf, tantôt un autre. Il suffit pour apercevoir ces signes de placer des grenouilles préparées sur la surface de l'organe, et on voit les grenouilles se contracter sur la portion de cet organe dans laquelle est distribué le nerf irrité. La décharge électrique peut être obtenue par une très-petite partie de l'organe détaché du poisson vivant, à la seule condition qu'on irrite d'une manière quelconque le filament nerveux qui s'y rend. Un morceau de l'organe, qui n'est pas plus gros que la tête d'une épingle, sur lequel on a posé le nerf de la grenouille galvanoscopique, ne manque jamais de donner la décharge quand on le coupe avec des ciseaux très-fins et qu'on irrite ainsi son filament nerveux.

Quant au cerveau, M. Matteucci s'est assuré en le découvrant très-rapidement dans une torpille vivante avec la lame d'un rasoir très-peu aiguisé, que la portion, qu'on ne peut toucher sans avoir de fortes décharges, est le quatrième lobe qui est

comme un renflement de la moelle allongée et qui est celui d'où partent les nerfs qui vont à l'organe électrique. Ce lobe détruit, toute décharge devient impossible quand même on laisserait le reste du cerveau intact, tandis que les trois autres peuvent être coupés et enlevés sans que la décharge cesse d'avoir lieu; cependant quand on les irrite on produit de fortes contractions musculaires, et quelquefois même des décharges si l'animal est très-vivant. Mais c'est un effet indirect semblable à ceux qui résultent de toute action excitante exercée sur le poisson électrique. Les organes essentiels de la fonction électrique se réduisent donc au dernier lobe du cerveau, à ses nerfs et à l'organe proprement dit; l'action de ce lobe sur la fonction électrique est direct, c'est-à-dire que si l'on touche la partie droite du lobe électrique, c'est l'organe droit qui donne la décharge, et réciproquement le gauche, si c'est la partie gauche du lobe que l'on touche.

Lorsque la torpille sur laquelle on opère est morte, du moins en apparence, c'est-à-dire que ses branchies ne font plus de mouvement, et qu'irritée, blessée et comprimée, elle ne donne plus de décharges, on obtient en touchant le lobe électrique, après qu'on a découvert le cerveau, des décharges électriques plus fortes que celles que l'animal donnait étant vivant; on n'en obtient point en touchant les autres parties du cerveau. Mais lorsqu'il s'est écoulé un certain temps, on n'a même plus de décharge en touchant le lobe électrique; toutefois en le blessant on en obtient encore quelques-unes, après quoi tout phénomène électrique est à jamais détruit.

Le courant électrique se comporte comme les autres actions stimulantes, c'est-à-dire qu'il ne produit que la décharge électrique lorsqu'il agit sur le quatrième lobe, ou sur les nerfs qui de ce lobe se rendent à l'organe. Son action spécifique diffère seulement dans ce cas, comme dans celui de la contraction musculaire, de celle des autres causes excitantes, en ce que son effet varie, dans certaines limites, avec sa direction relativement à celle de la ramification des nerfs. Ainsi, quand on fait passer un courant électrique dans une portion des nerfs de l'organe, on trouve qu'après la mort, dans une première période où la

vitalité est encore très-grande, le courant électrique direct ou inverse produit toujours la décharge soit à son établissement, soit à l'instant de son interruption, mais que dans la période suivante où la vitalité est moindre, la décharge n'est plus produite que par l'établissement du courant direct et par l'interruption du courant inverse.

Ce dernier fait complète les analogies que l'étude que nous venons de faire semble établir entre l'action qui détermine les décharges électriques et celle qui produit la contraction musculaire. Ces analogies sont en effet remarquables; ainsi, de même que la contraction musculaire, la décharge électrique dépend de la volonté de l'animal; elle est également déterminée par une excitation exercée sur certains nerfs; elle est proportionnelle à l'activité de la respiration et de la circulation, quoiqu'on puisse l'obtenir encore quand la circulation est suspendue dans l'organe; elle ne persiste que dans certaines limites de température; en un mot, toutes les circonstances qui modifient la fonction de l'organe électrique agissent également sur la contraction musculaire. La seule différence est que la décharge électrique, au lieu d'être comme la contraction musculaire une propriété commune à toutes les parties musculaires de l'animal et aux nerfs qui s'y rendent, est spécialisée dans un organe particulier propre au poisson électrique, à un lobe déterminé du cerveau et aux nerfs qui de ce globe vont à l'organe où ils se ramifient; ce lobe et ces nerfs n'ont pas d'autre fonction et ressemblent par là aux nerfs des sens et aux racines de la moelle épinière. Ainsi, toute action extérieure qui est portée sur le corps du poisson électrique et à la suite de laquelle l'animal donne la décharge, est transmise par les nerfs du point irrité au cerveau, et de là au lobe électrique et aux nerfs de l'organe; c'est un cas de l'action reflexe dont nous avons déjà parlé dans les paragraphes précédents.

Si maintenant nous rapprochons les phénomènes spéciaux qui sont propres aux poissons électriques des phénomènes généraux que présentent tous les autres animaux, et que nous avons décrits dans les paragraphes précédents, nous sommes amenés à conclure que les nerfs qui déterminent la décharge électrique

doivent être identiques dans leur état naturel et dans les modifications que cet état éprouve, aux nerfs du mouvement qui produisent la contraction musculaire. La seule différence est que ces nerfs, au lieu d'aboutir à un muscle ordinaire, aboutissent à l'organe particulier que nous avons appelé organe électrique, et que leur électricité, au lieu de se convertir en action motrice, s'accumule par l'effet de la disposition des parties dont se compose l'organe, de manière à donner de violentes secousses ; en effet, l'organe n'éprouve au moment de la décharge aucun changement de forme, contrairement à ce qui a lieu pour les muscles. Il est évident d'après les expériences de M. Matteucci, que chaque cellule ou chaque espace compris entre deux diaphragmes est l'organe élémentaire, et que chaque prisme formé par la réunion de ces organes élémentaires superposés est comme une pile ayant à ses extrémités deux pôles de nature contraire, dont la charge est proportionnelle au nombre des organes élémentaires qui constituent le prisme lui-même. Mais, pour obtenir la charge de cette pile et par conséquent la décharge, il faut que les nerfs qui se ramifient dans chaque cellule soient irrités, car il n'y a aucun effet électrique dans les parties de l'organe dont les nerfs ne le sont pas. C'est ce qu'on constate d'une manière évidente en prenant une torpille vivante et en coupant avec un rasoir l'organe parallèlement à la surface du poisson; on a alors une surface interne sur laquelle on voit les gros nerfs ramifiés; et si on distribue sur cette surface plusieurs grenouilles galvanoscopiques, on ne les voit s'agiter que sur les points où aboutissent les nerfs qu'on irrite. Il y a plus ; si on irrite un filament nerveux vers l'extrémité de l'organe, il n'y a jamais de décharge dans les points de l'organe tournés vers le cerveau, ce qui montre que la force nerveuse qui excite la décharge se propage dans le seul sens de la ramification du nerf comme dans la contraction musculaire, et que par conséquent c'est à l'extrémité des filaments nerveux qu'agit la cause qui produit la manifestation de l'électricité.

Ces points établis, si nous nous rappelons que l'irritation du nerf le constitue dans un état de polarité électrique, nous

comprendrons que le diaphragme dans lequel il vient se ramifier doit lui-même affecter un état électrique particulier. Or, c'est celle des deux surfaces du diaphragme à laquelle aboutissent les ramifications nerveuses qui est négative, tandis que l'autre est positive. Pour expliquer cette différence, il nous semble nécessaire d'admettre que les deux espèces de fibres nerveuses qui aboutissent à l'organe sont polarisées en sens contraire, les unes de façon que les pôles positifs de leurs particules soient tournés du côté de l'organe, les autres de façon que leurs pôles positifs soient tournés du côté du centre nerveux. Les premières seraient celles qui pénètrent plus profondément dans le diaphragme, d'où résulterait qu'elles polarisent ses molécules dans le même sens qu'elles sont polarisées elles-mêmes, ce qui constituerait un état positif pour la surface supérieure du diaphragme. Les secondes seraient celles qui, comme nous l'avons vu, sont simplement adhérentes à la surface inférieure du diaphragme au moyen de renflements semblables à des nucléoles et n'y pénètrent pas ; ce qui fait qu'elles doivent communiquer simplement à cette surface leur état négatif. Nous avons ainsi toutes les conditions réunies pour constituer une pile voltaïque, savoir : une succession de diaphragmes solides tous parallèles dans un plan horizontal, positifs sur une de leurs surfaces, et négatifs sur l'autre, puis un liquide électrolytique conducteur interposé entre ces diaphragmes. De plus, ces diaphragmes sont au nombre de 2,000 dans chacune des piles; et il y a en tout dans la torpille 940 piles semblables. Cette simple énumération suffit pour expliquer la puissance électrique de l'appareil sans qu'il soit nécessaire de supposer à chaque filament nerveux un état électrique plus fort que celui que nous leur avons trouvé dans les animaux ordinaires; seulement ici, par l'effet de la disposition particulière qui résulte de l'organisation de l'appareil électrique, les actions individuelles de ces filaments nerveux s'ajoutent toutes au lieu de rester isolées, comme cela a lieu quand les filaments se ramifient dans les muscles ordinaires.

Nous sommes obligés, il est vrai, d'admettre que les nerfs qui aboutissent à chaque diaphragme de l'organe ont deux

polarités différentes ; mais cette supposition nous paraît validée d'abord par le fait que les nerfs dont il s'agit ne sont point identiques puisque les uns se terminent d'une manière toute différente de la manière dont se terminent les autres. De plus, comment expliquer, sans cette hypothèse, le mode suivant lequel s'opère la réunion des deux électricités? En effet, quand il s'agit de la contraction musculaire, nous avons admis que l'équilibre électrique se rétablit entre l'extrémité positive du nerf qui aboutit au muscle et son extrémité négative qui est en communication avec le centre nerveux, au moyen de courants qui circulent dans les différentes parties du corps. Mais ici l'action des nerfs qui partent du quatrième lobe du cerveau est toute spéciale et locale, et il faut que l'équilibre électrique s'établisse dans un circuit dont font partie seulement le quatrième lobe, les nerfs qui en partent et l'organe dans lequel ils se ramifient. Or, l'excitation électrique partant du centre nerveux, rien n'est plus naturel que d'admettre que la polarisation qui en résulte se propage, suivant un certain sens, dans une partie des fibres nerveuses, et suivant l'autre sens qui n'est au fond que la continuation du premier, dans une autre partie de ces fibres ; de la même manière que lorsque, en frottant ou chauffant un corps dans certaines conditions, on le polarise de façon à avoir à l'une de ses extrémités de l'électricité positive libre, et à l'autre de la négative. Remarquons encore que le double rôle des nerfs qui aboutissent à l'organe électrique serait semblable à celui des nerfs de mouvement et de sentiment, que nous avons vu devoir être polarisés, lorsqu'ils sont excités, dans des directions contraires.

Ajoutons, pour prévenir toute objection, que lors même que les électricités positive et négative ne s'accumulent qu'aux extrémités des prismes dont se compose l'organe, il n'est pas nécessaire, pour avoir la secousse électrique, de toucher le prisme exclusivement aux deux surfaces de l'organe ; il suffit, pour recevoir la décharge, d'être en communication conductrice avec ces deux surfaces, et la peau toujours humectée de l'animal peut elle-même remplir en partie cet office. Il est vrai qu'alors la décharge est moins forte, vu qu'on n'en perçoit

qu'une portion dérivée plus ou moins considérable, la plus grande partie devant s'opérer par l'intermédiaire de la surface extérieure du poisson.

Il résulte donc de la théorie qui précède, que nous faisons dépendre la fonction électrique de la torpille de la même force nerveuse qui produit la contraction musculaire, c'est-à-dire d'une modification dans l'état électrique des nerfs provenant d'une action du cerveau qui dépend elle-même de la volonté, ou qui peut être provoquée soit dans le cerveau lui-même, soit plus directement encore sur le nerf, par une irritation artificielle d'une nature quelconque.

Le gymnote et les autres poissons électriques doivent leurs propriétés à des causes semblables à celles que nous venons d'analyser dans la torpille; tous ont en effet comme la torpille un organe particulier qui est l'organe électrique, et quoique cet organe diffère chez eux dans sa disposition générale et dans sa structure en quelques points, de celui de la torpille, il est facile de voir que son organisation est analogue et que son rôle est identique.

Le gymnote, ou anguille de Surinam [1], le plus étudié de ces poissons après la torpille, en diffère totalement par son aspect extérieur; il est long, flexible, gris-verdâtre, semblable à un long serpent, présentant une tête assez grosse avec des yeux placés en dessus; il atteint une longueur de $2^m,5$ à 3 mètres. Les secousses électriques qu'il lance sont bien plus fortes et surtout plus soutenues que celles de la torpille; on sait, par la description si pittoresque qu'a donnée Humboldt de la pêche des gymnotes, que leurs décharges électriques peuvent étourdir des chevaux et des mulets qu'on oblige de rester dans l'eau où se trouvent réunis plusieurs de ces poissons, au point de les faire tomber dans cette eau où ils se noient. Mais la force du gymnote s'épuise bientôt, et il lui faut du repos et une nourriture abondante pour pouvoir de nouveau posséder une grande puissance électrique. Le gymnote vit dans l'eau douce et non comme

[1] Il y a deux espèces de gymnotes, le *gymnote électrique* et le *gymnote royal*; mais ils ne diffèrent qu'en quelques points peu essentiels.

la torpille dans l'eau salée; on doit, quand il est captif, changer souvent la masse d'eau dans laquelle il vit. Toutes ces observations et d'autres encore concourent à montrer que sa fonction électrique est toujours, comme pour la torpille, proportionnelle à l'activité de la respiration et de la nutrition, ainsi qu'au degré de repos des muscles de l'animal.

Faraday a réussi à déterminer la direction du courant électrique dans le gymnote, qu'il a trouvé être de la tête à la queue dans le fil du galvanomètre dont les extrémités communiquent l'une avec la tête, l'autre avec la queue, en sorte que l'électricité positive est accumulée à la partie antérieure de l'animal, et l'électricité négative à sa partie postérieure. La décharge électrique du gymnote est donc dirigée de sa tête à sa queue dans l'eau où il plonge; aussi, quand il se courbe, la partie de l'eau comprise dans sa courbure est traversée par une foule de filets électriques disséminés qui tuent, en les foudroyant, les petits poissons qui sont sur leur route. Faraday a encore obtenu avec l'électricité du gymnote la décomposition de l'iodure de potassium, l'aimantation des aiguilles d'acier et l'étincelle d'induction. Schoenbein, qui a eu l'occasion de répéter la plupart des observations de Faraday sur le même gymnote qui avait servi aux expériences du savant anglais, a réussi à produire de vives étincelles, et même la combustion de l'or, en faisant communiquer deux feuilles d'or battu, respectivement avec la tête et la queue du poisson électrique. Il a fait passer la décharge à travers une chaîne de plusieurs personnes qui toutes ont éprouvé une très-violente commotion.

Enfin, MM. Miranda et Paci ont fait une étude détaillée des propriétés électriques du gymnote sur l'un de ces poissons arrivé de Rio-Janeiro à Naples en 1844, et sur lequel nous avons pu, M. Matteucci et moi, faire ensemble plusieurs expériences en 1845, à l'époque de la réunion du congrès scientifique. Il me paraît bien établi, par des observations multipliées, que la secousse électrique ne dépend que de la volonté de l'animal; mais quant à l'opinion émise par les deux physiciens napolitains, que le gymnote dirige son courant où il veut et en proportionne l'intensité à la résistance qu'il éprouve, elle n'est

qu'une illusion. Le gymnote peut seulement, par la flexibilité de son corps, se recourber de façon que l'animal qu'il veut tuer soit sur la ligne droite qui passe par sa tête et par sa queue, et par conséquent sur la direction du courant, qui, d'ailleurs, se disséminant dans le liquide, traverse tous les corps qu'il rencontre; c'est dans ce sens seulement qu'on peut dire que le gymnote dirige son courant. Quant à la supposition que le gymnote proportionne l'intensité de son courant à la résistance qu'il éprouve, les faits sur lesquels elle est fondée s'expliquent tout naturellement en se rappelant que l'effet du courant est toujours plus sensible dans les points où la résistance est la plus grande. Et si, quand on touche le gymnote par un corps isolant ou isolé, il ne donne que des décharges très-faibles et à peine sensibles, comme s'il savait que cette décharge ne pourra traverser le corps, cet effet tient, ainsi que M. Matteucci le fait remarquer, à ce que le poisson, éprouvant une sensation plus forte par la portion de la décharge, qui, dans ce cas, est obligée de passer par son corps, il est conduit, par cette sensation, à ne plus continuer les décharges.

MM. Miranda et Paci ont produit tous les effets magnétiques, calorifiques et chimiques qu'on avait déjà obtenus avant eux avec l'électricité du gymnote; ils ont, de plus que leurs devanciers, réussi à décomposer d'autres électrolytes que l'iodure de potassium, et en particulier le nitrate d'argent et l'acétate de plomb. M. Matteucci et moi nous avons observé un fait qui assimile bien le courant du gymnote à celui d'une pile voltaïque, c'est que lorsqu'on touche l'animal, d'une part, au milieu du corps, d'autre part, à la tête ou à la queue, on obtient au galvanomètre un courant qui est en intensité juste la moitié de celui qui est développé quand les deux points touchés sont la tête et la queue elle-mêmes.

Le gymnote possède, en effet, comme la torpille, un organe électrique composé d'un grand nombre de prismes semblables à des piles. Mais, seulement, ces piles sont dirigées de la tête à la queue de l'animal au lieu de l'être transversalement, comme dans la torpille, du ventre au dos. M. Pacini, qui a fait une étude anatomique de cet organe, a trouvé qu'il est formé de cloisons

minces et d'une nature fibreuse C (fig. 351), dirigées de la tête à la queue, et qui font l'office des parois des prismes dont se compose l'organe; ces prismes sont séparés en un très-grand nombre de compartiments par des diaphragmes A A, qui ont la forme de petites membranes longues et étroites, et qui sont situés perpendiculairement à la longueur de l'animal, de sorte qu'une de leurs faces est du côté de la tête et l'autre du côté de la queue. Nous pouvons appeler, comme dans la torpille, les premières les *faces supérieures*, et les secondes les *faces inférieures*, si nous supposons le gymnote suspendu verticalement la tête en haut, la queue en bas; supposition que nous avons faite dans la figure 351, qui représente son organe. La distance des cloisons mesure la largeur des diaphragmes qui varie de 1 à 3 millimètres; quant à leur longueur, elle est de 2 centimètres en moyenne, quantité qui exprime par conséquent la largeur des cloisons. Les diaphragmes se succèdent parallèlement entre eux dans chaque canal prismatique d'une extrémité à l'autre de l'organe électrique à de très-petites distances; M. Pacini a trouvé que l'espace occupé par 10 diaphragmes successifs était, en moyenne, de $0^{mm},530$, ce qui donne une distance moyenne de $0^{mm},15$ d'un diaphragme à l'autre. Il a observé, dans un angle de l'organe, des séries de diaphragmes tellement irrégulières qu'il les a distingués sous le nom de diaphragmes anormaux B (fig. 351); ils sont comme atrophiés, plus étroits et plus éloignés les uns des autres que les diaphragmes normaux.

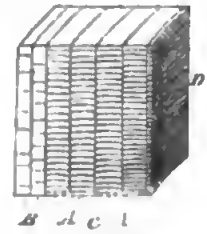


Fig. 351.

Dans un gymnote de longueur moyenne, c'est-à-dire de 80 centimètres, on trouve que l'organe électrique est de 65 centimètres environ; on en déduit que le nombre des diaphragmes électriques, dans une seule série, est à peu près de 4,000. D'après Hunter, le nombre des canaux prismatiques est d'environ 56 de chaque côté [1], soit 96 en tout; ces 94 piles renferment

[1] Ces 48 canaux prismatiques sont répartis entre deux organes séparés par

chacune 4,000 diaphragmes. Dans la torpille, il a 940 piles ou séries de diaphragmes au lieu de 96; il est vrai que chacune des piles ne renferme que 2,000 diaphragmes au lieu de 4,000; il résulte cependant de cette comparaison que le nombre des diaphragmes est bien plus considérable dans la torpille que dans le gymnote. Mais, par contre, leur surface est bien plus grande chez le gymnote que chez la torpille, puisqu'elle est de 50 millimètres carrés chez le premier, et seulement de 7 chez la seconde. Une autre différence, c'est que l'espace occupé par deux diaphragmes successifs est considérablement plus grand dans le gymnote que dans la torpille, puisque, lors même qu'ils ne renferment qu'un nombre double de diaphragmes, les prismes sont 15 fois plus longs environ.

Cette plus grande épaisseur des cellules est liée à une complication de structure que M. Pacini a observée; en effet, chaque diaphragme du gymnote est composé de deux parties solides superposées, mais éloignées l'une de l'autre; l'une, d'une apparence cellulaire, l'autre, très-mince, formée de *fibrilles*. Il y a de plus deux liquides, l'un interposé entre le corps *cellulaire* et la lamelle *fibrillaire*, et l'autre entre deux diaphragmes successifs. Le corps cellulaire, qui forme la partie supérieure de chaque diaphragme, est formé principalement d'une grosse lame ondulée, semi-transparente, qui a, en moyenne, une épaisseur de $0^{mm},01$. Des deux surfaces inférieure et supérieure du corps cellulaire s'élèvent une multitude de protubérances qui sont comme autant de cellules composées, destinées à augmenter la surface du corps cellulaire, surtout dans sa partie supérieure, où elles sont plus élevées, et qui est rendue par là environ cinq ou six fois plus grande. L'extrémité libre de ces protubérances cellulaires est très-rapprochée de la lamelle fibrillaire du diaphragme situé au-dessus, mais sans jamais le toucher; cet espace est rempli d'un liquide que M. Pacini appelle *surcellulaire;* les cellules inférieures, plus rares et plus petites, arrivent jusqu'à toucher la lamelle fibrillaire placée au-des-

une couche adipeuse, dont l'un, le *grand organe électrique* en renferme 34, et l'autre, le *petit organe électrique*, 14.

sous, et qui appartient au même diaphragme; cet espace est également rempli d'un liquide appelé *sous-cellulaire* Quant à la lamelle fibrillaire, elle est composée d'une multitude de fibrilles tendineuses qui forment une espèce de toile d'une épaisseur de $0^{mm},01$ environ, et qui est fixée sur les bords des cloisons fibreuses, non par une simple adhésion, comme le corps cellulaire, mais par continuité de tissus, car la lamelle fibrillaire est de la même nature fibreuse que les cloisons. Quant aux nerfs, après avoir traversé l'épaisseur des cloisons, ils pénètrent dans la lamelle fibrillaire de chaque diaphragme, et ils s'y distribuent en se bifurquant à de longs intervalles; mais la quantité de fibres nerveuses est beaucoup moins grande chez le gymnote que chez la torpille, sur une égale étendue d'un diaphragme électrique.

En résumé, on voit qu'à chaque diaphragme électrique du gymnote correspondent quatre parties qui se succèdent de haut en bas, le gymnote étant toujours supposé placé verticalement la tête en haut : le liquide surcellulaire, le corps cellulaire, le liquide sous-cellulaire et la lamelle fibrillaire; cette lamelle, qui constitue la partie inférieure des diaphragmes, représente leur surface négative, ce qui montre que chez le gymnote, comme chez la torpille, c'est la face du diaphragme où se distribuent les nerfs qui est la face négative.

M. Pacini croit voir dans l'appareil électrique du gymnote une image de la pile à deux liquides dans laquelle la membrane fibrillaire jouerait le rôle de la cloison poreuse. L'action chimique se passerait entre le liquide sous-cellulaire et le corps cellulaire, le liquide surcellulaire ne jouant que l'office de conducteur. Pour expliquer l'influence de la volonté de l'animal sur la production de l'électricité, M. Pacini admet que les réactions chimiques étant en très-grande partie subordonnées, dans l'économie animale, à l'action nerveuse, c'est cette action qui détermine l'effet chimique, d'où résulte l'effet électrique. Ainsi, tandis que dans la torpille la production de l'électricité serait un effet immédiat de l'action nerveuse, cette production ne serait dans le gymnote qu'un effet indirect de cette même action qui, en provoquant une action chimique, déter-

minerait ainsi la manifestation de signes électriques. M. Pacini appuie son opinion sur ce que dans l'organe électrique de la torpille les nerfs prédominent et les matériaux sont en moindre quantité, tandis que dans celui du gymnote, ce sont les matériaux qui prédominent et les nerfs qui font défaut.

De quelque manière qu'agisse la force nerveuse dans le gymnote, elle n'est pas moins indispensable dans le gymnote que dans la torpille pour la production de l'électricité; nous savons, en effet, d'après les observations de M. de Humboldt, que les décharges du gymnote cessent entièrement quand le cerveau a été enlevé, et qu'on ne réussit pas à les obtenir lors même qu'on irrite la moelle épinière. Ce fait est d'autant plus significatif qu'une grande partie des nerfs qui se ramifient dans l'organe du gymnote viennent de la moelle épinière. Mais, d'un autre côté, on ignore s'il existe dans le cerveau du gymnote, comme dans celui de la torpille, un lobe particulier d'où émanerait l'influence électrique. Du reste, quelles que soient les différences de structure entre l'organe électrique de la torpille et celui du gymnote, il me paraît difficile d'admettre qu'il y ait dans l'influence nerveuse deux modes d'action si différents, selon qu'il s'agit de l'un ou de l'autre des deux poissons électriques. Je suis plutôt disposé à admettre que dans le gymnote comme dans la torpille, la source primitive de l'électricité est dans les nerfs, mais en reconnaissant que les réactions chimiques que cette électricité provoque dans les deux organes, entretiennent cette électricité et contribuent à la formation du circuit électrique. La différence de structure des deux organes ne serait-elle point liée à la différence de conformation des deux poissons dont l'un long et flexible, l'autre large et rigide, ne pourraient évidemment renfermer deux appareils électriques semblables? La surface, proportionnellement plus grande et le nombre plus petit de diaphragmes électriques dans le gymnote, comparativement à la torpille, ne proviendraient-ils pas de la différence des deux milieux dans lesquels ils sont appelés à vivre, l'eau douce moins conductrice pour le premier, l'eau salée plus conductrice pour le second? Le fait est qu'une fois qu'il nous est bien démontré, par les recherches de M. Dubois-Reymond,

que les nerfs sont doués d'une électricité propre, et que c'est par voie électrique que se transmettent les influences nerveuses, il nous paraît éminemment probable que ce qui caractérise les poissons électriques, c'est la présence chez eux d'un organe particulier qui, par sa structure, par la manière dont les nerfs s'y distribuent, accumule, en leur conservant leur nature, les effets électriques de ceux des nerfs qui s'y rendent, effets qui, pour les autres nerfs chez ces poissons et dans les autres animaux où il n'y a pas d'organes semblables, se transforment en contractions, en sécrétions, etc. Mais nous reconnaissons que, pour confirmer notre manière de voir, il y aurait encore à faire soit sur la torpille, soit surtout sur le gymnote, de nombreuses et importantes recherches.

Il existe encore un poisson, le *silure électrique*, dont l'organe électrique a été l'objet d'un examen détaillé de la part de M. Pacini, qui a trouvé qu'il est formé (fig. 352) par de petites membranes BB, qui s'entrecroisent dans des directions différentes et constituent les parois d'espaces ou alvéoles de formes octaédriques, d'un millimètre cube de capacité environ, et remplis d'un liquide albumineux. Ce singulier organe électrique forme au-dessous de la peau AA une couche spongieuse qui enveloppe tout le corps de l'animal, moins l'extrémité du museau et les différentes nageoires, de sorte que le poisson est renfermé dans son organe électrique comme dans un sac. Il est à remarquer que son corps ne se trouve pas en contact immédiat avec le *sac électrique* qui le renferme, mais qu'il existe une forte couche adipeuse EE, interposée, qui semble destinée à isoler le corps de l'animal et à le garantir de sa propre électricité; couche séparée de même par une forte membrane fibreuse des alvéoles octaédriques [1]. Cette précaution paraît d'autant plus nécessaire que dans le silure les diaphragmes de l'organe n'étant point disposés en séries parallèles, mais tous dans plu-

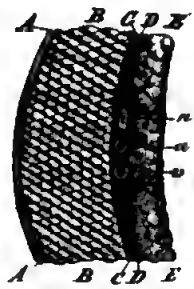


Fig. 352.

[1] C'est dans la membrane fibreuse que pénètrent en *n* le nerf, en *a* l'artère, et en *v* la veine.

sieurs directions différentes, les décharges électriques peuvent être dirigées dans une foule de sens différents, et par conséquent sortir de tous les points de la surface de son corps ; de sorte que sans la couche adipeuse isolante, le silure serait exposé à souffrir des effets électriques auxquels il donne lui-même naissance. Il est à présumer que chez lui l'organe électrique est plutôt une arme de *défense* comme les épines du hérisson, tandis qu'il est une arme d'*offense* chez la torpille et le gymnote.

§ 7. Production d'électricité dans les végétaux.

En voyant la force vitale déterminer dans les animaux des phénomènes électriques, on s'est souvent demandé si, sous l'empire de cette même force, il ne se manifesterait pas dans l'acte de la végétation quelques signes d'électricité. Bien des tentatives ont été faites dans ce but, et si les résultats en sont encore incertains, cela tient à la difficulté d'isoler les causes variées qui peuvent donner naissance à des manifestations électriques quand on opère sur des végétaux vivants. Parmi ces causes, les plus actives sont sans aucun doute les réactions chimiques soit des parties humides des végétaux sur les conducteurs solides ou liquides destinés à soutirer leur électricité, soit des différentes portions fluides des végétaux les unes sur les autres. Les différences de température des diverses parties d'un même végétal peuvent aussi avoir quelque influence. Enfin l'action de l'électricité atmosphérique dont les végétaux vivants sont d'excellents conducteurs, doit aussi quelquefois se faire sentir dans la perception de l'électricité végétale.

Sans remonter à d'anciennes observations dont les résultats vagues et incertains ne peuvent inspirer aucune confiance, nous nous bornerons à rappeler les recherches de MM. Pouillet, Becquerel et Wartmann. M. Pouillet, en faisant germer des plantes dans des capsules isolées et au milieu d'une atmosphère suffisamment sèche, avait réussi à recueillir de l'électricité négative dans les capsules, ce qui indiquait qu'une quan-

tité égale d'électricité positive avait passé dans l'air. M. Riess, en répétant ces expériences, n'obtint pas autant de constance dans la manifestation des signes électriques que M. Pouillet en avait trouvé. MM. Becquerel et Wartmann opéraient d'une autre manière. Leur procédé consistait à insérer dans des parties différentes d'un végétal des pointes ou des lames de platine mises en communication avec les extrémités d'un galvanomètre. Les résultats obtenus par ces deux physiciens sont à peu près semblables. Tous les deux ont trouvé des courants électriques dans toutes les parties de la plante et dans toutes les saisons de l'année. Dans la même section transversale de plantes ligneuses, le courant se dirige de l'aubier vers l'écorce fraîche en passant par le point de contact. L'écorce et l'aubier sont négatifs relativement au cœur de l'arbre. Les parties de l'écorce qui contiennent la séve (le *parenchyme*) sont négatives relativement à celles qui sont situées plus haut. Les sucs descendant dans l'aubier (le *cambium*) sont négatifs à l'égard de ceux qui sont dans les feuilles. Si l'une des pointes du galvanomètre est plongée dans le sol près des racines d'une plante et l'autre en contact avec les feuilles, ou insérée dans l'écorce, il se manifeste un courant qui indique que la terre est chargée d'un excès d'électricité positive et l'écorce et les feuilles d'électricité négative. On n'obtient que peu ou point d'effet quand une des aiguilles est dans le ligneux près de la moelle et l'autre dans la terre. Les végétaux, quels qu'ils soient, même ceux qui ont une tige herbacée, donnent les mêmes effets. Becquerel en conclut que, dans l'acte de la végétation, lorsque la germination est accomplie, la séve ascendante qui communique avec le sol par l'intermédiaire des racines, lui transmet constamment l'excès d'électricité positive dont elle s'empare dans sa réaction sur le liquide qui se trouve dans le parenchyme cortical, tandis que ce liquide prend l'électricité contraire qu'il fournit à l'air par l'évaporation. La végétation agirait dans un sens inverse des causes qui font que l'air est en général positif et la terre négative, et il pourrait en résulter, dans certains cas, une influence sur les phénomènes électriques de l'atmosphère.

Becquerel estime que des courants fermés circulent constam-

ment dans l'intérieur de chaque plante, qu'ils sont dirigés de l'écorce à la moelle, et de là jusqu'aux dernières branches ; et il attribue la production de ces courants à la présence de deux liquides différents réagissant chimiquement l'un sur l'autre par l'intermédiaire de tissus très-peu perméables. Il remarque que ces deux liquides qui sont la séve ascendante et la séve parenchymeuse sont dans les conditions voulues pour dégager des courants sans l'intermédiaire de lames métalliques, savoir : de former des contacts par des transitions insensibles. M. Wartmann admet aussi l'existence dans l'intérieur des plantes de courants fermés dont les courants perçus ne sont que des dérivations. Il est aussi d'accord avec M. Becquerel sur ce que les feuilles de l'écorce sont négatives par rapport au sol. Ce dernier physicien, en implantant les aiguilles de platine fixées aux extrémités du galvanomètre dans différentes parties des tubercules de pomme de terre, a trouvé des courants qui lui ont démontré l'hétérogénéité des sucs qui se trouvent dans les tissus depuis l'épiderme jusqu'au centre; hétérogénéité qui paraît être en rapport avec la constitution organique du tubercule. L'action de l'eau sur ces divers sucs détermine également des courants dans lesquels l'eau prend l'électricité positive, de sorte que M. Becquerel arrive à conclure de ses nombreuses observations, que les effets électriques dont il s'agit sont tellement complexes qu'il faut bien se garder d'en tirer des conséquences sur le rôle que doit jouer l'électricité dans les fonctions organiques, et par conséquent dans les phénomènes de la vie végétale.

Les doutes de M. Becquerel se sont trouvés confirmés par les recherches très-complètes que M. Buff a faites récemment sur ce sujet. Afin de changer le moins possible les conditions naturelles où une plante se trouve placée, M. Buff a employé l'eau comme intermédiaire pour établir la communication entre divers points de la plante et le galvanomètre. La disposition expérimentale était la suivante : Deux vases de verre contenaient une couche de mercure d'environ 2 centimètres d'épaisseur, dans laquelle plongeaient les extrémités de deux fils de platine enfermés dans des tubes de verre. Sur le mercure

on versait de l'eau; on faisait communiquer les fils de platine avec un galvanomètre, et, en fermant le circuit par une bande de papier humide, on s'assurait de l'absence de toute force électromotrice due à l'hétérogénéité du mercure; il n'existait presque jamais de force électromotrice de ce genre, ou s'il en existait une, on la faisait promptement disparaître par l'agitation du mercure; on évitait ainsi les difficultés qui se seraient présentées si les fils de platine eussent été en contact direct avec l'eau. Ensuite on supprimait la bande de papier et l'on faisait plonger dans l'eau les deux parties de la plante dont ont voulait examiner l'état électrique.

M. Buff a d'abord comparé l'état électrique des feuilles avec celui des racines. La plante ayant été enlevée de terre et ses racines bien nettoyées dans un courant d'eau, de manière à enlever toute la terre adhérente sans altérer en aucune manière l'état de la surface, on fit plonger les racines dans l'un des vases, et les feuilles dans l'autre. On obtint ainsi un courant dirigé constamment des racines vers les feuilles à travers la plante, mais dont l'intensité variait d'une plante à une autre. Pour être bien sûr de l'absence de toute action électromotrice étrangère, on renversait la plante sur elle-même, et la direction du courant était immédiatement changée. Lorsqu'on a opéré sur des plantes très-sèches ou très-résineuses et, par suite, très-peu conductrices, on a disposé plusieurs individus parallèlement les uns aux autres dans les mêmes expériences. On a examiné de cette façon les plantes dont voici la liste :

Pommier [1]	Beta oleracea	Fraisier
Prunier [1]	Daucus carota	Nicotiana tabacum
Sapin [1]	Oxalis stricta	Diverses graminées
Rosier [1]	Reseda	Cactus opuntia
Euphorbes diverses	Viola tricolor	Erica urceolaris
Senecio vulgaris	Viola canina	Acropera laddigesii [2]

On a ensuite examiné des branches séparées du végétal, en plongeant les feuilles dans un des vases pleins d'eau, et l'ex-

[1] Les expériences ont été faites avec de très-jeunes arbrisseaux.

[2] Plante de la famille des orchidées.

trémité coupée dans l'autre. On a toujours obtenu un courant dirigé à travers la plante de la section artificielle mise à nu vers les feuilles. On a expérimenté de la sorte sur les plantes précédentes et sur un certain nombre d'autres dont voici la liste :

Chêne	Thé
Charme	Spiræa ulmaria
Saule	Vigne
Populus alba	Pinus silvestris
Paulownia imperialis	Pinus lanceolata
Erable	Sedum tectorum
Nerium oleander	Sedum hybridum

Tropœolum majus
Diverses fougères
Raifort
Chêne
Pavot
Genévrier
Groseillier

Les courants ainsi obtenus ont souvent persisté pendant plusieurs heures sans jamais changer de direction.

Si l'on enlevait l'écorce en un point quelconque de la plante, et si l'on faisait plonger dans un des vases la partie ainsi mise à nu, les feuilles plongeant dans l'autre vase, on obtenait toujours un courant dirigé, dans l'intérieur de la plante, de la partie mise à nu vers les feuilles. Entre deux feuilles intactes il ne s'établissait aucun courant ; mais, si l'une des feuilles était déchirée, il se produisait un courant dirigé de la feuille déchirée vers la feuille demeurée intacte.

On pouvait même obtenir un courant avec une feuille unique, en y faisant une déchirure et établissant un circuit entre la déchirure et la portion intacte de la feuille. Ces expériences prouvent clairement que les courants dont il s'agit n'existent pas dans la plante vivante, puisqu'on peut leur donner telle direction qu'on voudra par rapport aux organes de la végétation, en choisissant convenablement le point où l'on met à nu l'intérieur du végétal.

L'écorce jeune et fraîche, les boutons et les fleurs se compor-

tent exactement comme les feuilles. Il en est de même d'un certain nombre de fruits : tels sont les raisins, les pommes, les prunes, les baies de l'épine-vinette, celles du troëne, les capsules du raifort, les gousses de vesces, etc.

Il n'est pas nécessaire d'enlever toute l'écorce pour observer les effets qui viennent d'être décrits ; il suffit d'arracher l'épiderme. L'intérieur de l'écorce se comporte donc, par rapport aux feuilles, comme l'intérieur du bois.

Enfin, même dans les champignons, on peut observer des phénomènes semblables ; l'intérieur du champignon est négatif par rapport à la surface intacte. L'expérience a été faite sur les champignons suivants :

Agaricus campestris
Agaricus nodus
Agaricus muscarius
Lycoperdon gemmatum

On peut donc regarder comme établi que *les racines et toutes les parties internes des plantes qui sont remplies des sucs de la végétation sont négatives par rapport à la surface plus ou moins humide des feuilles, des fleurs, des fruits et des jeunes rameaux.*

La raison de ce phénomène est facile à concevoir. L'intérieur de la plante contient des sucs de diverse nature qui ne peuvent passer à travers l'épiderme, tandis que l'humidité extérieure imbibe toujours un peu cette membrane. On a donc en contact une membrane imbibée d'eau et des organes végétaux chargés de liquides de diverse nature ; si l'on établit entre cette membrane et ces organes un circuit fermé, il doit évidemment se produire un courant. Mais il paraît aussi évident que ce courant n'a qu'un rapport très-indirect et très-éloigné avec les phénomènes de la végétation.

Il nous paraît donc démontré que jusqu'ici nous n'avons aucune preuve de l'existence, dans les végétaux vivants, d'un état électrique analogue à celui que nous avons trouvé dans les muscles et dans les nerfs des animaux, et que toutes les traces d'électricité qu'on a aperçues peuvent être attribuées

uniquement à des réactions chimiques ordinaires et dans quelques cas, comme nous le verrons, à l'électricité atmosphérique. Les phénomènes de la force osmotique étudiés dernièrement par Graham ne sont point contraires à cette conclusion, puisque c'est à une action chimique qu'il attribue la production de l'électricité qui accompagne suivant lui l'endosmose.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Galvani. — Électricité animale ; résumé de ses travaux par Gavarret. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXV, p. 58.

Volta. — Électricité animale. — *Ann. de ch.* T. XXIII, p. 276 et 301. — Organe électrique du gymnote. T. XL, p. 255.

Humboldt. — Électricité animale. — *Ann. de ch.* T. XXII, p. 51. — Gymnotes électriques. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XI, p. 408.

Humboldt et Gay-Lussac. — Torpille. — *Ann. de ch.* T. LVI, p. 15.

Nobili. — Courant de la grenouille. — *Bibl. univ.* (1828). T. XXXVII, p. 10.

Matteucci. — Électricité animale. — *Arch. de l'électricité.* — T. II, p. 419 et 626 ; t. III, p. 5 et 153. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LVI, p. 439, et t. LXVIII, p. 93. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. VI, p. 30 ; t. VIII, p. 309 ; t. XV, p. 64 ; t. XVIII, p. 109 ; t. XXIII, p. 230. — *Trans. phil. de la Société royale de Londres* (1847-1850). — Poissons électriques. — *Bibl. univ.* T. XI (1837), p. 392 ; t. XII, p. 163, et t. XVII (1838), p. 37. — *Arch. de l'électricité.* t. I, p. 571, et t. V, p. 491. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXI, p. 160. — Respiration musculaire. — *Compte rendu de l'Académie des sciences.* t. XLII, p. 648 ; et *Arch. des sc. phys.* T. XXXII. — *Traité des phénomènes électrophysiologiques des animaux*, Paris, 1844.

Dubois-Reymond. — Électricité animale. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXX, p. 119 et 178 ; t. XXXIX, p. 114. — *Arch. des sc. phys.* T. XV, p. 134. — *Ann. der physik.*, 1843 à 1853. — *Untersuchungen über thierische electricitat.* T. I et II, Berlin, 1848.

Davy. — Torpille. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XLI, p. 438.

Santi-Linari. — Torpille. — *Bibl. univ.* T. VIII (1837), p. 395, et t. XVIII (1838), p. 155.

Faraday. — Gymnote. — *Bibl. univ.* T. XXIV (1839), p. 387.

Schœnbein. — Gymnote. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 445.

Miranda et Paci. — Gymnote. — *Arch. de l'électricité.* T. V, p. 496.

Pacini. — Organes des poissons électriques. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXIV, p. 313.

E. Wartmann. — Électricité végétale. — *Arch. des sc. phys.* T. XV, p. 301.

Becquerel. — Électricité végétale. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXXI, p. 46.

Buff. — Électricité végétale. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XLI, p. 198.

CHAPITRE II.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

§ 1. Existence de l'électricité atmosphérique et moyens de la constater.

Les anciens, quoique fort ignorants en fait de sciences physiques, avaient cependant étudié avec quelque soin les phénomènes atmosphériques. Les Étrusques, qui s'en étaient occupés d'une manière toute particulière, y avaient cherché les moyens de prédire l'avenir, de détourner les présages funestes et d'apaiser les dieux. Ils avaient surtout observé tout ce qui avait rapport aux coups de foudre, dont ils reconnaissaient trois sortes, suivant la gravité de leurs effets; ils distinguaient même onze espèces de foudre, d'après la théorie qu'ils avaient déduite de leurs observations; les Romains n'en admettaient que deux, celles de jour attribuées à Jupiter, celles de nuit attribuées à *Summanus*. Selon les Étrusques, il y avait des foudres qui sortaient de la terre (*infera*, *terrena*) et d'autres qui venaient du ciel (*a sideribus venentia*); celles-ci frappaient toujours obliquement, tandis que les premières s'élevaient perpendiculairement. La partie la plus mystérieuse de la science des aruspices étrusques consistait assurément dans les cérémonies par lesquelles ils prétendaient attirer la foudre; c'était le culte de *Jupiter Elicius*. Les Étrusques l'avaient apporté à Rome; Numa en avait appris d'eux le secret, et il avait consigné le détail de ces rites dans ses commentaires; son successeur Tullius Hostilius ayant voulu répéter ces redoutables cérémonies, mais n'ayant pas pris les précautions nécessaires, fut tué par la foudre.

La croyance à la *science fulgurale* dura un grand nombre de siècles, et Constantin le Grand devenu chrétien y avait encore foi, puisque plusieurs années après sa conversion au christianisme il fit une loi pour autoriser les Romains à consulter les aruspices lorsqu'un édifice avait été frappé de la foudre. Plus tard encore et dans le temps du siége de Rome par Alaric, des Étrusques se présentèrent au préfet de cette ville, et l'assurèrent qu'ils avaient été témoins de la défense d'une ville par le moyen de certaines cérémonies qui avaient attiré des tonnerres et des tourbillons de feu, et l'avaient ainsi délivrée de ses ennemis. Ils offraient de défendre Rome de cette manière, et l'évêque qu'on consulta autorisa un essai qui n'eut, du reste, aucun résultat.

Quelques auteurs ont pensé que les récits et les superstitions des Étrusques cachaient de véritables connaissances physiques; ils ont cru en retrouver des traces chez quelques autres peuples de l'antiquité, et ont cité l'opinion de Michaelis qui a soutenu que les pointes dorées qui se trouvaient, selon l'historien Josèphe, sur le faîte du temple de Jérusalem, faisaient l'office de paratonnerres et mettaient cet édifice à l'abri de la foudre. Ils alléguaient aussi un passage de Ctésias qui parle de deux épées dont le fer avait la vertu de dissiper les nuages, la grêle et les tourbillons. Mais ces indications, jointes à tout ce qu'on connaît des théories *fulgurales* des Étrusques, ne sauraient constater l'existence d'une véritable science. On peut seulement en conclure que certains phénomènes électriques avaient été remarqués dans l'antiquité. Ainsi on avait observé ces petites flammes qui apparaissent au sommet des mâts de vaisseau, et que les marins appellent aujourd'hui le *feu Saint-Elme*. On avait vu les lueurs qui brillent quelquefois à la pointe des lames et des épées, et les Romains les avaient déjà remarquées huit ans après l'expulsion des rois, pendant la guerre contre les Sabins. Mais tous ces phénomènes ne furent jamais rapportés à leur cause réelle, car il est évident que les Étrusques n'avaient aucune véritable connaissance de l'électricité; ils furent seulement un objet de superstition exploité par les prêtres de Jupiter Elicius.

Il faut arriver au milieu du dix-huitième siècle, jusqu'à Franklin, pour avoir la preuve que les phénomènes de l'éclair, du tonnerre et de la foudre sont dus à l'électricité. Cependant, déjà avant l'illustre Américain, on avait bien soupçonné l'identité qui existe entre ces phénomènes électriques. Après avoir produit pour la première fois l'étincelle électrique, le docteur Wall la compara immédiatement aux éclats de la foudre. L'analogie était frappante, et les physiciens cherchaient à l'établir par des rapprochements plus ou moins ingénieux. Mais tout se passait en raisonnements qui ne pouvaient rien conclure, parce qu'en physique c'est l'expérience seule qui doit prononcer. Franklin eut donc la pensée hardie d'aller chercher l'électricité au sein même des nuages; comme il ne s'agissait que de porter un corps dans la région du tonnerre, il eut l'idée de se servir du cerf-volant, et, après quelques tentatives infructueuses, il parvint à tirer de l'extrémité de la corde qui retenait le cerf-volant lancé au milieu des nuages, une vive étincelle qui fut suivie de plusieurs autres. L'expérience de Franklin eut lieu en 1752; elle était faite en même temps en Europe avec succès par plusieurs physiciens, et entre autres par Dalibard à Marly et par M. de Romas. Ce dernier ayant eu, en juin 1753, l'heureuse idée de mettre un fil de métal dans toute la longueur de la ficelle qui retenait le cerf-volant, avait obtenu des effets énergiques; il avait pu tirer des étincelles de neuf ou dix pieds de longueur et d'un pouce de grosseur, qui étaient accompagnées d'un bruit étourdissant. Malgré toutes les précautions qu'il avait prises pour isoler ses appareils au moyen de rouleaux de verre, M. de Romas fut une fois renversé par la violence du choc, mais sa chute n'eut aucune suite fâcheuse, tandis que Richmann à Pétersbourg fut foudroyé par l'électricité des nuages, qu'il avait amenée dans son cabinet au moyen d'un conducteur. Il fut donc constaté d'une manière évidente que la foudre n'est qu'une décharge électrique. Nous verrons plus loin les conditions et les formes qui sont propres à ce mode de manifestation de l'électricité, ainsi que les moyens de se préserver de ses atteintes; nous devons auparavant étudier de plus près

et en dehors des phénomènes accidentels auxquels il donne naissance, l'état électrique de l'atmosphère.

Lemonnier est le premier qui, au moyen de tiges métalliques isolées, ait constaté que, même à l'état serein, l'air est chargé d'électricité. Beccaria a confirmé ces résultats en les étendant et cherchant à déterminer les circonstances diverses qui influent sur l'électricité de l'atmosphère, quand il n'y a pas d'orage. Mais les deux physiciens qui se sont occupés de ce sujet avec le plus de soin à la fin du dernier siècle sont sans contredit de Saussure et Volta. Au lieu d'appareils fixes tels que des pointes isolées placées à de grandes hauteurs et mises en communication par des fils métalliques avec l'observateur, ces deux physiciens employaient des électroscopes portatifs munis à leur sommet d'une tige de fer susceptible d'être allongée, et qu'on élevait dans l'air plus ou moins haut en tenant l'instrument dans la main.

Fig. 353.

L'électromètre de de Saussure, dont on se sert encore avec avantage à cause de sa facilité de transport, est formé de deux fils fins de métal (fig. 353) terminés chacun par une petite balle de sureau *aa* et adaptés à une tige métallique fixée à la partie supérieure d'une cloche de verre BB. Les deux petits pendules sont ainsi placés dans l'intérieur de la cloche. La tige est elle-même surmontée d'un conducteur A terminé en pointe, composé de trois parties pouvant s'ajuster les unes dans les autres et chacune d'une longueur de 2 décimètres; ce conducteur est destiné à recueillir de l'électricité au-dessus de la tête de l'observateur. Pour préserver l'électromètre de la pluie ou de la neige, on visse à la partie supérieure de la cloche un petit chapeau en laiton CC de forme conique et d'un décimètre de diamètre. Une échelle divisée est appliquée sur l'une des faces de la cage de verre, afin d'apprécier les angles de divergence des deux pendules.

De Saussure a gradué comme il suit son appareil : ayant pris deux électromètres aussi égaux et semblables que possible, il électrisa l'un d'eux de manière que les deux boules de sureau s'écartassent par exemple de 6 millimètres; avec le crochet de l'autre électromètre qui n'était point électrisé il toucha le crochet du premier; à l'instant l'électricité se partagea entre les deux, et la divergence fut, dans l'un comme dans l'autre, de 4 millimètres. Ayant enlevé l'électricité à l'un des électromètres, il le mit en contact de nouveau avec l'autre, et l'écartement fut de $2^{mm}\cdot8$. Les trois divergences de 6, de 4 et de $2^{mm}\cdot8$ correspondaient donc à des intensités comme 1, $\frac{2}{3}$ et $\frac{1}{4}$. De Saussure parvint ainsi à former une table qui change à la vérité d'un appareil à l'autre, mais que tout observateur doit établir avant de commencer une série régulière d'observations.

Volta a substitué aux fils métalliques munis de deux petites boules de sureau deux brins de paille longs d'environ 5 centimètres, suspendus à deux petits anneaux très-mobiles adaptés à la tige de l'électromètre, et qui, dans l'état de repos, sont contigus. Ces petites pailles, quand elles sont sèches, sont beaucoup plus légères que les fils métalliques et offrent plus de surface. Lorsque l'appareil est sensible, sa marche est régulière jusqu'à 26° d'écartement. Volta conseille de placer à l'extrémité de la pointe de la tige qui surmonte son électromètre un corps enflammé destiné à soutirer l'électricité à de plus grandes distances; il a obtenu des effets souvent doubles de ceux qu'accusait l'appareil sans la présence du corps enflammé.

Cependant de tous les électroscopes, le plus sensible est celui à feuilles d'or que nous avons décrit dans le premier volume de ce traité; il peut très-bien s'adapter aux observations d'électricité atmosphérique, comme l'a fait M. Ronalds à Kew en le perfectionnant en quelques points et en particulier dans l'isolement de ses différentes parties.

Comme nous l'avons dit plus haut, il y a deux manières très-différentes de faire ces observations : l'une consiste à avoir des tiges très-élevées, isolées, destinées à soutirer l'électricité de l'air et à l'amener par des fils conducteurs à des appareils électrométriques; l'autre repose sur l'emploi d'instruments

portatifs qu'on place dans différentes régions de l'air. Dans le premier mode, on peut avoir un véritable courant d'électricité si l'on fait aboutir l'extrémité du fil qui communique avec la pointe isolée à l'un des bouts d'un galvanomètre dont l'autre bout communique avec le sol; on obtient une déviation de l'aiguille dont l'amplitude dépend de la quantité d'électricité et de la facilité avec laquelle elle s'écoule. M. Colladon, qui le premier a réussi à percevoir de cette manière l'électricité atmosphérique, avait eu soin de bien isoler les tours du fil du galvanomètre, comme au reste il l'avait fait dans la construction du galvanomètre destiné à l'électricité des machines[1]. Mais cet appareil n'est pas très-sensible, vu qu'il exige, pour que l'aiguille aimantée dévie de quelques degrés, une quantité considérable d'électricité et une assez grande conductibilité de l'air et du sol afin que l'écoulement soit continu, ce qui n'a pas toujours lieu.

Le second mode d'observation, qui consiste à avoir des instruments portatifs, repose au fond sur le principe que la charge de l'instrument provient de l'influence exercée à distance sur lui par l'électricité que possède au moment de l'expérience l'air au milieu duquel il est placé. Sous ce rapport, il n'y a aucun avantage à terminer le conducteur dont l'électroscope est surmonté par une pointe; une boule est préférable, car elle permet à l'instrument de mieux conserver l'électricité qu'il a acquise. La seule différence, c'est que lorsque l'instrument est terminé par une pointe, l'électricité de nom contraire à celle dont la partie agissante de l'atmosphère est chargée, s'échappe par cette pointe; tandis qu'avec la boule c'est l'électricité de même nom, qui s'écoule par la main ou par le conducteur qu'il faut mettre en communication avec l'électromètre pendant qu'il est en expérience. Dans ce dernier cas, l'appareil accuse une électricité de nom contraire à celle qui l'a chargé. C'est sur ce dernier principe que Peltier a construit un des meilleurs électromètres atmosphériques qui existent, et dont l'emploi a été très-utile dans l'étude de cette électricité.

[1] Tome I, page 327.

Voici la description de cet appareil (fig. 354) :

Une tige de cuivre AB, terminée à sa partie supérieure par une boule creuse de même métal C de 1 décimètre de diamètre, et à sa partie inférieure par une boule beaucoup plus petite B, est fixée, par l'intermédiaire de cette dernière, à une tige de cuivre qui descend dans une cage de verre dont elle est isolée au moyen d'un tampon de gomme laque. Cette tige se bifurque en formant une espèce d'anneau DD au centre duquel se trouve une pointe *m*, destinée à recevoir une aiguille très-mobile *ab*. L'aiguille *ab* est maintenue constamment dans le méridien magnétique à l'aide d'une aiguille aimantée beaucoup plus petite *cd*, faisant système avec elle et attachée au-dessus de la chape. Indépendamment de cette aiguille, une autre aiguille EF, également en cuivre mais plus forte, est fixée solidement à la tige qui descend dans un tube de verre rempli de gomme laque et encastré dans une tablette de bois; toute la partie métallique se trouve ainsi isolée, de sorte que la perte d'électricité doit être très-faible. L'instrument est posé sur une tablette à trois pieds ou vis, à l'aide desquels on la met horizontale. La boule B, en tournant autour du tube AB, fait monter ou descendre la partie G de la tige centrale; quand on veut se servir de l'appareil, on élève cette partie G, le système des deux aiguilles *cd* et *ab* peut alors se mouvoir librement sur la pointe de la tige *m*. Quand l'instrument doit être placé au repos, on abaisse G, et le mouvement des aiguilles se trouve entravé.

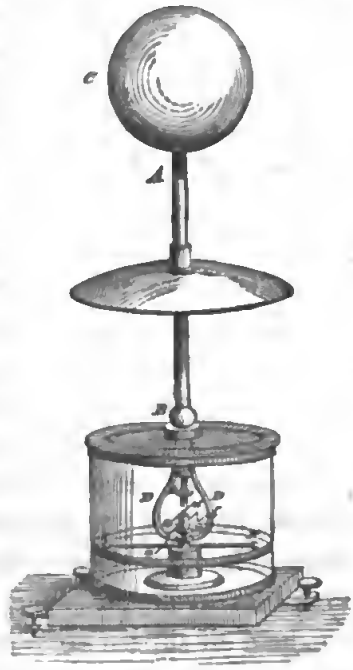


Fig. 354.

Lorsqu'on veut opérer, on oriente l'instrument de telle sorte que l'aiguille fixe EF soit mise dans le méridien magnétique ; l'aiguille mobile *ab*, qui se meut avec l'aiguille aimantée, vient

se placer parallèlement à la première. La boule C se trouve-t-elle au-dessous d'un corps électrisé positivement ou négativement, il y a action par influence : dans le premier cas, l'électricité négative provenant de la décomposition de l'électricité naturelle est dissimulée à la partie supérieure de la boule, et l'électricité positive est refoulée dans la partie inférieure de l'instrument, et fait dévier l'aiguille mobile *ab* d'un certain nombre de degrés mesurés au moyen de deux cercles divisés, dont l'un est collé sur la tablette, et l'autre sur le disque supérieur de la cage en verre, afin d'éviter les erreurs de la parallaxe.

Cet appareil accuse, dans cette hypothèse, l'action d'influence exercée par le corps électrisé chargé positivement; mais on peut charger négativement l'aiguille en touchant le bouton avec le doigt et retirant le corps électrisé. En opérant avec un corps électrisé négativement placé à distance, on charge par influence l'appareil d'électricité positive.

L'emploi de l'électromètre de Peltier repose sur un fait important observé par Ermann : ce physicien avait placé à une certaine hauteur dans l'atmosphère un électroscope à feuilles d'or, sans avoir pu recueillir d'électricité. Il porta dans une couche d'air supérieure un fil de métal placé horizontalement à l'extrémité d'une tige isolante, et l'abaissa ensuite rapidement jusqu'à ce qu'il touchât l'électroscope; l'appareil accusa aussitôt l'électricité positive dans la région où se trouvait le conducteur. L'effet était inverse quand ce dernier se trouvait dans une couche inférieure et qu'on le relevait avec rapidité. Ce fait s'explique facilement : l'atmosphère est chargée d'électricité positive, qui augmente d'intensité à mesure qu'on s'élève, comme on le verra plus loin; la terre, au contraire, se comporte comme si elle était chargée d'électricité négative. Si donc on suppose qu'un corps en équilibre électrique avec un espace donné s'élève ou s'abaisse, c'est-à-dire s'approche d'un espace chargé d'une plus grande quantité d'électricité positive, ou s'en éloigne, il devra présenter un excès de tension négative ou positive, provenant d'une action par une influence; en revenant rapidement dans la première position, le corps reprendra l'état naturel. C'est un effet de ce genre qui avait fait penser à

quelques physiciens, notamment à M. Palagi, qu'il y a un dégagement d'électricité par le seul fait qu'on approche ou qu'on éloigne l'un de l'autre deux corps conducteurs; l'analyse de ces effets curieux a démontré qu'ils proviennent d'une action inductrice exercée par l'électricité dont l'air est naturellement chargé. MM. Gay-Lussac et Biot, dans leur voyage aérostatique, avaient déjà observé un effet analogue à celui qui a été décrit par Ermann.

Peltier, en se fondant sur cette action par influence, a proposé d'opérer comme il suit : on monte sur une terrasse disposée à cet effet, en plaçant l'instrument sur une tablette supérieure élevée de $1^m,50$; on l'équilibre en touchant la tige dans la partie la plus inférieure; on redescend, et on place l'instrument sur la tablette inférieure qui lui est destinée. En équilibrant l'instrument, il faut élever le bras le moins possible; car si on l'élevait assez haut pour toucher au globe, la main, devenant négative par influence, repousserait l'électricité négative de la boule; elle neutraliserait la portion positive qu'elle y attirerait, et l'instrument serait chargé négativement au moment où l'on éloignerait la main. Il faut donc toucher la tige le plus bas possible, et même avec un corps fin, comme un fil métallique, pour éviter l'influence de la masse de la main sur le reste de la tige. Étant équilibré pendant son élévation, l'instrument, en l'abaissant, donne des signes d'électricité négative, tandis qu'en l'élevant il en donne de positive. En opérant, il faut avoir égard à cette inversion pour ne pas être induit en erreur sur le véritable signe de l'électricité atmosphérique. On notera donc une tension positive lorsque l'électromètre donnera un signe négatif en descendant; et une négative si l'instrument descendu marque un signe positif.

Il ne suffit pas de connaître les angles d'écart de l'aiguille, il faut encore déterminer les forces qui leur sont proportionnelles. Peltier faisait cette détermination par la balance de torsion; M. Quetelet se sert de la méthode plus simple et suffisamment exacte de de Saussure, qui a été déjà exposée et qui exige l'emploi de deux instruments parfaitement semblables.

§ 2. Étude de l'électricité de l'atmosphère à l'état normal.

Après avoir décrit les principaux faits qui ont mis les physiciens sur la voie de reconnaître l'existence d'une électricité atmosphérique et les moyens les plus efficaces de percevoir cette électricité, il nous faut maintenant chercher à connaître l'état électrique de l'atmosphère. Sous ce rapport, il nous faut distinguer l'état électrique normal tel qu'il existe par un temps serein, et l'état exceptionnel qui constitue les temps orageux. Nous verrons que, sans que le temps soit précisément orageux, il suffit, pour modifier l'état électrique normal, de la présence dans une atmosphère sereine de quelques nuages, de la chute de la pluie et de la neige; mais les modifications qu'amènent ces précipitations aqueuses sont loin d'avoir l'importance qui résulte de l'existence d'un véritable orage accompagné du tonnerre et de l'éclair. Nous nous occuperons dans ce paragraphe de la détermination de l'état électrique normal de l'atmosphère et des modifications qu'apportent à cet état les causes que nous avons signalées, réservant pour les paragraphes suivants ce qui concerne les orages et les phénomènes électriques exceptionnels qui les accompagnent.

L'air, sous un ciel parfaitement serein, est constamment positif, mais cette électricité positive n'est pas uniformément répartie dans l'atmosphère; elle est, il est vrai, à peu près de même intensité dans une couche horizontale, mais plus forte dans les couches supérieures, et d'autant plus forte qu'on s'élève davantage. C'est ce qu'avaient déjà reconnu de Saussure et Ermann. A la surface du sol l'électricité est nulle; elle ne commence à être sensible en rase campagne qu'à 1 mètre ou $1^m,50$ au-dessus du sol. Quand il y a sur la surface de la terre des arbres, des édifices, en un mot des corps élevés, la hauteur à laquelle l'air commence à donner des signes d'électricité positive devient plus grande. Il semble évident que l'air et la terre sont chargés d'électricités contraires qui se recombinent continuellement dans les couches inférieures de l'atmosphère, soit directement, soit par l'intermé-

diaire des corps placés à la surface du sol. On conçoit donc que la hauteur à laquelle la tension positive de l'air devient sensible doive varier avec la facilité que cette neutralisation éprouve à s'opérer, laquelle dépend elle-même de bien des circonstances, en particulier du degré d'humidité de l'air. M. Becquerel a constaté l'accroissement de l'électricité positive avec la hauteur, en lançant avec un arc des flèches auxquelles était fixé l'un des bouts d'un fil de soie recouvert de clinquant dont l'autre bout communiquait avec un électroscope. L'expérience était faite au Grand-Saint-Bernard et sur un des plateaux qui avoisinent l'hospice. Peltier a reconnu le même fait au moyen d'un ballon captif; seulement il a remarqué que dans dans certaines circonstances, lorsqu'il existe dans l'air des nuages à peine visibles, l'électricité devient nulle, puis négative, pour redevenir peu de temps après positive.

M. Quetelet, en opérant avec l'électromètre et suivant la méthode de Peltier, a trouvé à la suite d'un grand nombre d'observations que, dans un lieu nullement dominé par les corps avoisinants, l'intensité électrique de l'air croît à partir d'un point déterminé proportionnellement aux hauteurs; mais il n'a pu vérifier cette loi que dans des limites très-restreintes. Son but était surtout de savoir quelle était la hauteur constante à laquelle il devait se placer pour faire d'une manière convenable les observations régulières d'électricité atmosphérique. Il avait établi au haut de la tourelle de son observatoire une petite plate-forme entourée d'une balustrade en fer, de laquelle partait un appareil qui permettait d'élever l'électromètre à plusieurs mètres de hauteur et de l'équilibrer dans chacune de ses positions; il était nécessaire que la tablette sur laquelle était placé l'instrument dominât tous les corps environnants et en particulier la balustrade. En effet le point où l'électricité était nulle se trouvait à peu près à la hauteur de la balustrade.

Il résulte de ce qui précède qu'il importe, pour faire de bonnes observations d'électricité atmosphérique, que le conducteur quelconque qui accuse l'état électrique de l'air en participant lui-même à cet état, soit placé à une hauteur suffi-

sante pour dominer tous les corps environnants. Aussi quand ce corps est l'extrémité d'une pointe métallique isolée, il faut qu'elle soit située au haut d'un mât très-élevé, comme à l'Observatoire de Paris où ce mât était placé sur le toit du bâtiment, ou comme à celui de Genève où le mât fixé en terre était assez long pour que la pointe de platine qui le terminait fût à 27 mètres environ au-dessus du sol. Quand le corps qui reçoit l'électricité est le conducteur qui fait partie lui-même de l'électromètre, comme dans les expériences faites à Bruxelles par M. Quetelet, et à Munich par M. Lamont, il faut avoir soin d'élever dans chaque observation l'instrument à une hauteur telle qu'il ne soit pas dominé.

Les premières observations un peu régulières d'électricité atmosphérique sont dues à de Saussure, qui avait étudié ses variations diurnes, et avait trouvé un premier maximum entre 8 et 9 heures du matin, un premier minimum à 6 heures du soir, un second maximum à 10 heures du soir, et un second minimum à 6 heures du matin; mais il ne regardait pas ces déterminations comme bien précises; il avait remarqué en effet qu'elles changent avec la saison; celles que nous venons d'indiquer se rapportent aux mois d'été et diffèrent notablement de celles relatives aux mois d'hiver. Lemonnier et Beccaria avaient déjà remarqué ces variations dans l'état électrique de l'air avec les heures de la journée.

Schübler en 1811 avait conclu de plusieurs observations que le premier minimum a lieu dans chaque saison à peu près au lever du soleil, et le second minimum entre 2 et 5 heures de l'après midi dans tous les mois également, que l'heure du premier maximum varie avec les saisons, étant pour les mois de juin, juillet et août de 6 heures du matin à 7 heures et demie, pour les mois de septembre, octobre et novembre de 8 à 9 heures, pour décembre, janvier et février de 9 à 10 heures, et pour mars, avril et mai de 7 à 8 heures et demie. L'heure du second maximum, qui a lieu entre 7 et 10 heures du soir, varie aussi avec les saisons.

Arago, à la suite d'observations régulières faites en 1830 pendant quelque temps à l'Observatoire de Paris, avait trouvé

l'heure de 8 heures 48′ du matin pour le premier maximum dans le mois de mars; M. Plantamour, à Genève, était arrivé au même résultat, c'est-à-dire qu'il avait obtenu un premier maximum entre 8 et 9 heures du matin, puis un minimum tel qu'il n'y avait presque aucun signe électrique entre midi et 3 heures, enfin un second maximum, mais moins fort que le premier, entre 8 et 9 heures du soir.

Le nombre des physiciens qui se sont occupés d'observations relatives à l'électricité atmosphérique est très-considérable; malheureusement il n'en est que peu parmi eux qui les aient suivies pendant un long espace de temps. Clarke en Irlande, Romershausen et Dellmann en Allemagne, Palmieri à Naples, ont tous trouvé une variation diurne dans l'électricité atmosphérique recueillie par un ciel serein; seulement ils diffèrent quelque peu sur l'heure précise des maxima et des minima, et M. Palmieri à Naples ne trouve pas la période diurne aussi prononcée qu'elle paraît l'être dans les localités plus septentrionales.

M. Peltier, sans s'être livré à des observations bien suivies sur l'électricité atmosphérique, a cependant eu l'occasion d'en faire de temps à autre de très-précises dans des jours où l'atmosphère était parfaitement sereine et pure. Il a trouvé qu'après un premier minimum, qui a lieu une heure environ avant le lever du soleil, vient un premier maximum qui varie de 6 à 11 heures du matin suivant la saison, puis un minimum se présente peu avant le coucher du soleil, et il est suivi d'un second maximum vers 9 ou 10 heures du soir. L'intensité, à partir de cette heure, diminue jusqu'à atteindre le premier minimum du jour suivant. Les signes d'électricité qui sont toujours positifs s'affaiblissent d'autant plus dans une journée que l'évaporation est plus considérable. Ainsi M. Peltier a quelquefois observé dans la même journée 150 à 200 degrés au maximum du matin, et 3 ou 4 au minimum de l'après-midi; mais il arrive aussi souvent que d'aussi grandes variations sont suivies d'orages.

Les observations qui, à cause du temps assez long (plusieurs années) pendant lequel elles ont été continuées, comme aussi

par la précision et le soin avec lesquels elles ont été dirigées, nous paraissent devoir inspirer le plus de confiance, sont celles de M. Ronalds à Kew, réunies et commentées par M. Birt, celles de M. Quetelet à Bruxelles, et celles de M. Lamont à Munich.

Les observations de Kew ont été faites au moyen des électroscopes ordinaires mis en communication avec un appareil conducteur isolé, élevé au-dessus du sol et destiné à recueillir le mieux possible l'électricité de l'air ambiant; ces observations ont été au nombre de 15170 pendant une période de cinq années; sur ce nombre 14515 sont d'électricité positive et 665 de négative. Les observations d'électricité positive ont fourni les éléments de la détermination des ordonnées des courbes diurne et annuelle de l'électricité atmosphérique principalement pendant les trois années 1845, 1846 et 1847, auxquelles 10176 observations ont contribué. Voici quel a été le résultat de la discussion, relativement à la courbe diurne.

D'après la moyenne de trois années, à chacune des heures d'observation, c'est-à-dire à toutes les heures paires, temps moyen de Grennwich, pendant le jour et la nuit, il paraît que la tension de l'électricité atmosphérique est à son minimum à deux heures du matin. A dater de cette heure, il y a une augmentation graduelle jusqu'à six heures du matin; après cette heure, la tension croît plus rapidement, sa valeur à huit heures du matin étant presque double de celle de six heures; l'accroissement est alors plus gradué jusqu'à dix heures, époque du premier maximum ou maximum du matin. A partir de cette heure, la tension décline graduellement jusqu'à quatre heures du soir, époque où sa valeur n'est que légèrement supérieure à celle de huit heures du matin. Ce second minimum est appelé par l'auteur minimum *diurne*, pour le distinguer du minimum *nocturne* qui a lieu à deux heures du matin. Après cela, la tension augmente rapidement jusqu'à huit heures du soir, et, après une légère élévation à dix heures du soir, époque du maximum principal ou du soir, la marche ascendante de la tension est terminée. Le maximum du soir est notablement supérieur à celui du matin ou de dix heures. Entre dix heures

du soir et minuit, la tension décroît presque jusqu'à la valeur du minimum diurne.

Quant à la période annuelle, on peut remarquer que les plus basses tensions se manifestent en juin et août, celle de juillet étant légèrement *supérieure* à celle des deux mois susnommés. En septembre, il y a une faible élévation qui augmente en octobre. Cette augmentation devient plus rapide de novembre à janvier, puis elle éprouve un temps d'arrêt, l'augmentation en février étant moindre que celles de décembre et janvier. En février on atteint le maximum, auquel succède en mars une diminution rapide de tension, qui se poursuit en avril et mai, la diminution atteignant son minimum en juin, mois où la tension est à son point le plus bas.

Les observations de Bruxelles ont été faites par M. Quètelet avec l'électromètre de Peltier, d'après la méthode que nous avons indiquée dans le paragraphe précédent. Nous insérons ici deux tableaux choisis parmi tous ceux qu'a publiés M. Quetelet, et qui nous paraissent donner une idée très-exacte des résultats obtenus. Le premier est relatif aux variations mensuelles de l'électricité de l'air, le second donne l'électricité de l'air dans ses rapports avec l'état du ciel.

VARIATIONS MENSUELLES DE L'ÉLECTRICITÉ DE L'AIR.

MOIS.	1844	1845	1846	1847	1848	MOYENNE.
Janvier.	»	471°	562°	957°	487°	605°
Février.	»	548	256	413	295	378
Mars.	»	262	95	282	164	200
Avril.	»	93	94	221	155	141
Mai.	»	163	49	67	59	84
Juin.	»	51	39	47	48	47
Juillet.	»	58	33	43	61	49
Août.	90	89	57	11	64	62
Septembre.	91	95	62	39	63	70
Octobre.	110	299	98	107	120	131
Novembre.	127	334	274	160	152	209
Décembre.	340	742	799	356	281	507
Moyenne annuelle.	»	267	202	225	162	206

ÉLECTRICITÉ DE L'AIR DANS SES RAPPORTS AVEC L'ÉTAT DU CIEL.

	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.
Ciel couvert.	268°	220°	129°	17°	46°	36°	41°	56°	42	75°	109°	181°
Ciel serein.	1133	493	261	149	63	37	35	64	78	168	226	571

Les observations faites dans la vue de constater les variations annuelles de l'électricité de l'air ont eu lieu, chaque jour, vers l'heure de midi, et ont commencé en août 1844. Les résultats de chaque année s'accordent parfaitement, et peuvent se résumer de la manière suivante : 1° l'électricité atmosphérique, considérée d'une manière générale, atteint son maximum en janvier, puis décroît progressivement jusqu'au mois de juin, qui présente un minimum d'intensité ; elle augmente pendant les mois suivants jusqu'à la fin de l'année. 2° Le maximum et le minimum de l'année ont, pour valeurs respectives, 605 et 47 degrés ; en sorte que l'électricité, en janvier, est treize fois aussi énergique qu'au mois de juin. La valeur moyenne de l'année est représentée par les valeurs que donnent les mois de mars et de novembre. 3° Les maxima et les minima absolus de chaque mois suivent une marche absolument analogue à celle des moyennes mensuelles ; les moyennes de ces termes extrêmes reproduisent également la variation annuelle, bien que d'une manière moins prononcée. Afin de déterminer l'intensité de l'électricité de l'air dans ses rapports avec l'état du ciel, M. Quetelet a séparé, pour chaque mois de l'année, les nombres qui se rapportaient à un ciel entièrement couvert de ceux observés par un ciel serein, ou bien offrant assez peu de nuages pour que les huit ou neuf dixièmes au moins fussent entièrement découverts. Pour ne pas compliquer les résultats par des influences étrangères, il a omis les observations faites pendant les orages, les neiges, les pluies et les

Digitized by Google

brouillards. Le tableau ainsi formé a mis en évidence les résultats suivants :

1° Quel que soit l'état du ciel, l'électricité de l'air présente un maximum en janvier, et un minimum vers le solstice d'été.

2° La différence entre le maximum et le minimum est beaucoup plus sensible par les temps sereins que par les temps couverts. Dans la dernière circonstance, ces nombres sont 268 et 36, dont le rapport est 7 environ. Dans des temps sereins, le maximum de janvier est de 1133°, et le minimum de juillet 35°; le rapport de ces nombres est 32, valeur considérable.

3° Pendant les différents mois, l'électricité de l'air est plus forte quand le ciel est serein que quand il est couvert, excepté vers les mois de juin et de juillet, quand l'électricité atteint un maximum dont la valeur est à peu près la même, quel que soit l'état du ciel.

A partir de cette époque, l'électricité de l'air, par un ciel serein, surpasse d'autant plus l'électricité observée par un ciel couvert, qu'on se rapproche davantage de janvier; et, dans ce dernier mois, le rapport est de plus de 4 à 1. Cette forte intensité électrique par un ciel serein, en hiver, est une circonstance très-remarquable, et avait été constatée déjà par tous les physiciens qui se sont occupés de l'électricité atmosphérique, quoiqu'ils lui attribuassent une valeur relative bien moins grande.

M. Quételet a réuni dans un tableau particulier les observations faites pendant des circonstances extraordinaires, tels que des brouillards, des neiges ou des pluies, et qu'il n'avait pas employées dans le calcul des moyennes. Voici les résultats qu'il a obtenus : l'intensité électrique observée pendant les brouillards a, en moyenne, à peu près exactement la même valeur que celle observée pendant les neiges; cette valeur est très-élevée et correspond aux maxima moyens observés pour les premiers et les derniers mois de l'année. Il ne semble pas, du reste, qu'elle subisse l'influence des saisons. Les valeurs observées pendant une pluie tranquille s'éloignent peu des valeurs ordinaires que l'on observe pendant le cours de l'année.

Dans quelques circonstances, une forte électricité, soit positive, soit négative, a été observée à l'approche de la pluie ou après la pluie. Pendant les quatre années qu'embrassent les observations de M. Quetelet, l'électricité n'a été observée négativement que vingt-trois fois, à l'heure ordinaire de ces observations; et il fait remarquer qu'elle n'a été observée négativement qu'une seule fois pendant les quatre mois d'octobre, novembre, décembre et janvier. Ces électricités négatives précédaient ou suivaient, en général, des pluies et des orages; voici comment elles se sont distribuées : l'électricité a été observée négativement six fois pendant la pluie, neuf fois avant la pluie, cinq fois après la pluie, deux fois pendant des pluies qui tombaient à des distances éloignées, une fois sans cause apparente.

De l'ensemble des observations faites pour constater la variation diurne de l'électricité de l'air, M. Quetelet déduit les conclusions suivantes :

1° L'électricité de l'air, estimée à une hauteur toujours la même, subit une variation diurne qui présente généralement deux maxima et deux minima.

2° Les maxima et les minima se déplacent d'après les différentes époques de l'année.

3° Le premier maximum arrive, en été, avant 8 heures du matin et vers 10 heures en hiver; le second maximum s'observe, après 9 heures du soir en été, et vers 6 heures en hiver. L'espace de temps qui sépare les deux maxima est donc de plus de 13 heures à l'époque du solstice d'hiver.

4° Le minimum du jour se présente vers 3 heures en été et vers 1 heure en hiver. Les observations ont été insuffisantes pour établir la marche du minimum de la nuit.

5° L'instant qui présente le mieux l'état moyen électrique de la journée dans les differentes saisons arrive vers 11 heures du matin.

Nous n'insisterons pas sur les observations de M. Lamont à Munich; quoiqu'elles soient faites avec l'électromètre de Peltier et d'après la même méthode que celle de Bruxelles, elles en diffèrent assez notablement quant aux résultats. On pourra

en juger d'après le tableau ci-joint dans lequel M. Quetelet a réuni les observations de Bruxelles, de Kew et de Munich faites à l'heure de midi, et qu'il a rendues comparables en prenant pour unité la moyenne mensuelle.

MOIS	NOMBRES OBSERVÉS			NOMBRES PROPORTIONNELS			BRUXELLES	
	BRUXELLES	KEW	MUNICH	BRUXELLES	KEW	MUNICH	Nombres proportionnels	Nombres observés
Janvier.	518°	182°4	6°34	2,82	2,40	1,48	1,61	50°
Février.	333	179,3	5,98	1,81	2,35	1,39	1,45	45
Mars.	169	58,2	5,18	0,92	0,76	1,21	1,13	35
Avril.	105	40,7	3,04	0,57	0,54	0,71	0,77	24
Mai.	81	41,3	2,56	0,44	0,55	0,60	0,65	20
Juin.	40	26,8	3,11	0,22	0,35	0,72	0,55	17
Juillet.	42	31,8	3,15	0,23	0,42	0,73	0,55	17
Août.	62	28,5	3,03	0,34	0,38	0,71	0,68	21
Septembre.	74	31,0	2,83	0,40	0,41	0,66	0,81	25
Octobre.	140	65,1	3,59	0,76	0,85	0,83	1,03	32
Novembre.	230	80,5	5,51[1]	1,25	1,34	1,28	1,29	40
Décembre.	412	126,3	7,20[1]	2,24	1,65	1,68	1,48	46
L'année.	184	74,3	4,29	12,00	12,00	12,00	12,00	31

[1] Ces nombres appartiennent à 1850; les précédents à 1851.

Il résulte de ces observations que les tensions électriques, en hiver et en été, sont comme 9 à 1 pour Bruxelles, comme 6 à 1 pour Kew, et comme 2 à 1 seulement pour Munich.

M. Quetelet attribue les différences remarquables entre ses observations et celles de M. Lamont essentiellement à la méthode employée par ce dernier physicien pour déduire des indications directes fournies par l'instrument, l'état électrique réel de l'air. Cette méthode fondée sur le calcul diffère de la méthode expérimentale employée, soit par Peltier, soit par M. Quetelet lui-même pour graduer l'électromètre, et qui consiste, comme nous l'avons vu, soit à estimer la valeur des degrés de l'instrument en rappportant les charges électriques à la balance, soit à dresser une table d'après la méthode de

de Saussure, fondée sur le partage de l'électricité entre des boules de surface égale.

Quelle qu'en soit la cause, une si grande divergence entre les résultats obtenus par des observateurs aussi distingués que MM. Lamont et Quetelet nous montre combien il y a encore d'incertitude dans la détermination bien précise de l'électricité atmosphérique. Cette incertitude ne tient pas seulement à l'imperfection des instruments, mais bien aussi à la nature du phénomène qui est éminemment complexe. Il s'agit en effet d'estimer les variations dans l'état électrique de la couche d'air dont l'influence peut se faire sentir sur l'instrument employé. Or, les couches d'air sont-elles dans des conditions identiques dans tous les lieux d'observation; la configuration du sol, les constructions ou les arbres qui recouvrent sa surface qui ne sont jamais semblables, ne peuvent-elles pas influer d'une manière différente, suivant les localités, sur l'électricité des couches d'air voisines? L'étendue de la couche qui agit sur l'électromètre doit varier elle-même avec la sensibilité de l'instrument, et il n'est pas certain que les changements qu'éprouve l'électricité de l'air suivent les mêmes lois dans une couche limitée et dans une couche très-étendue. Ainsi l'électromètre de M. Lamont, qui est surmonté d'une boule beaucoup moins considérable que celui de M. Quetelet, doit être d'une sensibilité beaucoup moindre, et peut par conséquent donner des résultats différents.

Mais de toutes les circonstances, celle qui influe le plus sur l'indication de l'instrument, c'est sans aucun doute l'humidité de l'air. Il est vrai que l'électromètre de Peltier échappe en partie à l'action de cette cause parce qu'il n'est influencé que par l'action inductive de l'atmosphère, ou plutôt par la différence des actions inductives de la terre et de l'atmosphère qui l'enveloppe; mais si, au lieu d'être terminée par une boule, sa tige l'est par une pointe, par un faisceau de pointes ou par une mèche allumée, comme dans les expériences de de Saussure et de Volta, il s'opère, outre les phénomènes d'induction, un rayonnement d'électricité dans l'espace, qui est beaucoup influencé par l'humidité de l'air, par la pluie et par la force du

vent, causes qui n'affectent pas d'une manière sensible l'instrument quand il est surmonté de la boule. Mais c'est surtout quand on opère avec des appareils fixes que l'action de l'humidité de l'air ambiant se fait sentir, en diminuant l'isolement de la pointe ou de la boule destinée à recueillir l'électricité de la couche dans laquelle elle est placée. La tige isolante a beau être de verre peu hygrométrique, il est impossible d'éviter que par les temps très-humides elle ne se recouvre d'une couche aqueuse qui, quelque mince qu'elle soit, n'en est pas meins conductrice. Pour bien apprécier l'influence de l'humidité générale de l'atmosphère sur les variations de l'électricité atmosphérique, il faut donc opérer avec l'électromètre de Peltier surmonté de la boule, qui est de tous les appareils celui qui est le plus à l'abri des perturbations accidentelles que nous avons signalées. C'est ce qu'a fait M. Quetelet, et les résultats consignés dans le tableau suivant et qui sont les résumés des observations faites par ce savant observateur, à Bruxelles, de 1842 à 1847, doivent sous ce rapport inspirer la plus grande confiance.

MOIS	ELECTRICITÉ. MOYENNE DES		Moyenne des maxima et minima	HYGROMÈTRE pendant les observ. élect.		Hygromètre en général 1842 à 1847	ÉLECTRICITÉ pendant l'humidité		ÉLECTRICITÉ en général
	maxima	minima		maxima	minima		maximum	minimum	
Janvier.	71,9	27,8	49,8	92,6	94,8	93,7	53,0	55,0	50
Février.	64,5	26,9	45,7	87,5	88,4	92,2	45,2	44,3	45
Mars.	55,5	18,6	37,0	84,7	85,1	90,3	36,2	26,0	35
Avril.	41,4	9,2	25,3	83,3	84,1	89,3	21,7	20,6	24
Mai.	37,0	4,3	20,6	80,2	80,3	87,6	15,0	19,0	20
Juin.	31,9	2,9	17,4	83,8	80,5	84,6	27,0	11,0	17
Juillet.	33,0	3,3	18,1	75,1	77,1	88,1	23,0	6,0	17
Août.	54,2	7,8	21,0	83,4	78,9	88,7	9,0	5,0	21
Septembre.	35,5	16,0	25,7	84,8	83,9	91,8	17,5	12,5	25
Octobre.	50,5	10,3	30,4	87,2	91,2	94,4	27,7	44,0	32
Novembre.	56,3	20,0	38,1	91,3	94,7	95,0	28,0	47,0	40
Decembre.	69,7	30,5	50,1	92,7	92,7	95,7	50,0	53,7	46
L'année.	48,45	14,80	31,62	85,55	85,97	99,0	29,44	28,62	13,0

Un fait assez remarquable qui ressort de ce tableau, c'est

que l'humidité agit d'une manière toute différente dans les mois froids et dans les mois chauds ; elle augmente l'électricité dans les mois d'hiver, elle la diminue dans les mois d'été. C'est qu'au fond l'humidité agit de deux manières dont les effets tendent à se contrarier. D'une part elle facilite l'écoulement de l'électricité accumulée dans les régions supérieures de l'atmosphère jusqu'à la couche où se fait l'observation, d'autre part elle facilite l'écoulement dans le sol de l'électricité que possède cette couche; ainsi d'une part elle augmente l'intensité des manifestations électriques de l'instrument, d'autre part elle les diminue. Cette diminution a été constatée par Peltier qui a observé en particulier que plus l'air est humide, plus il faut élever l'électromètre (de 1, 2 et même 10 mètres) pour obtenir le même signe d'électricité, qu'on obtient facilement en l'élevant seulement de 2 décimètres quand le ciel est serein.

Il faudrait, pour expliquer cette double action, mieux connaître qu'on ne la connaît l'influence sur la conductibilité électrique de la vapeur d'eau, de la température et de la force élastique. Mais, quelle qu'elle soit, il n'y a aucun doute que l'état hygrométrique de l'air n'influe d'une manière très-prononcée sur les manifestations électriques. Est-ce simplement comme facilitant la transmission de l'électricité; est-ce peut-être aussi comme réservoir elle-même d'électricité que l'humidité agit dans les manifestations de l'électricité atmosphérique ? C'est ce que nous chercherons à analyser dans les paragraphes suivants, où nous nous occuperons de l'électricité des brouillards et des nuages, et de l'origine même de l'électricité atmosphérique. Nous nous bornons pour le moment à signaler l'effet sans chercher à en découvrir la cause.

Quoique le pouvoir conducteur de l'air quand il est humide soit bien plus considérable que quand il est sec, M. Quetelet n'a jamais pu en employant le galvanomètre, même un galvanomètre très-sensible[1] pour percevoir l'électricité atmosphérique,

[1] Il employait un galvanomètre de Gourjon de 2400 tours, très-sensible, communiquant par l'une de ses extrémités avec une tige métallique élevée au-dessus du toit de l'Observatoire de Bruxelles et terminée par une houppe de fils de pla-

obtenir des effets assez prononcés pour reconnaître une action soit diurne, soit annuelle. Les manifestations d'électricité atmosphérique à l'état dynamique, telles que les fournit le galvanomètre, n'ont lieu d'une manière bien sensible qu'à l'approche des nuages orageux ou pendant les brouillards, les pluies et les neiges. Quant au sens des courants qu'on obtient dans ces cas, il change fréquemment, comme nous le verrons en nous occupant des orages.

Malgré toutes les imperfections et les divergences que présentent encore les diverses observations relatives à l'électricité atmosphérique, elles s'accordent cependant sur quelques points importants. Elles conduisent toutes à reconnaître que, à partir du sol, où il n'y a aucune manifestation électrique, on trouve à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, quand elle est sereine et à l'état normal, des signes constants d'électricité positive qui vont en croissant. Elles accusent en outre pour une même hauteur dans l'atmosphère une variation dans l'état électrique de la couche d'air, soit mensuelle, soit diurne. Les variations mensuelles sont telles que les maxima d'électricité indiqués par les instruments tombent sur les mois dans lesquels les jours sont les plus courts, et les minima sur ceux dans lesquels ils sont les plus longs. Les variations diurnes diffèrent notablement en amplitude avec les lieux d'observation; elles sont assez généralement en rapport avec les variations de l'humidité de l'air, en ce sens que l'état hygrométrique et l'état électrique de l'air sembleraient suivre une marche assez parallèle. Cependant les physiciens ne sont pas complétement d'accord sur ce parallélisme complet, du moins pendant tous les mois de l'année également.

Les anomalies et les divergences tiennent probablement à ce que l'influence qu'exerce la présence de la vapeur aqueuse sur l'électricité accusée par les instruments placés dans une couche d'air, change tout à fait de nature quand cette vapeur, en se précipitant, devient visible sous forme de nuage, de brouillard

tine très-fins, et par l'autre extrémité avec le sol extérieur au bâtiment; la tige et le galvanomètre étaient isolés avec le plus grand soin.

ou de pluie. Il arrive même, ainsi que cela semble résulter de changements brusques observés dans l'état électrique de l'air, que la précipitation commence souvent à avoir lieu même avant d'être visible; c'est ce que prouve au reste le fait qu'on a vu quelquefois la pluie tomber par un temps complétement découvert et en l'absence de tout nuage. Sous l'influence de ces précipitations aqueuses qui troublent l'état normal de l'atmosphère, non-seulement l'électricité positive ne suit plus dans l'intensité de ses signes sa marche régulière, mais on la voit souvent se changer en électricité négative plus ou moins forte. Les manifestations d'électricité négative faites par les instruments destinés à percevoir l'électricité atmosphérique précèdent, accompagnent ou suivent généralement l'apparition des orages ou même celle de simples nuages ainsi que la chute de la pluie; ce n'est pas à dire qu'elles se présentent dans tous les cas où les nuages, les orages et la pluie se montrent, il s'en faut de beaucoup, mais elles n'ont lieu que dans ces cas-là. Aussi renvoyons-nous ce que nous avons à en dire au paragraphe suivant, consacré à l'état électrique anormal de l'atmosphère. C'est dans ce même paragraphe également que nous signalerons les variations irrégulières et brusques d'intensité que manifeste l'électricité positive, phénomène qui accuse, comme le précédent, une perturbation dans l'état électrique de l'atmosphère.

Mais avant de terminer le paragraphe actuel, nous devons nécessairement aborder une question que nous ne ferons qu'effleurer pour le moment, appelés que nous serons à y revenir dans le paragraphe relatif à l'origine de l'électricité atmosphérique. Cette question est de savoir quelle conclusion nous devons tirer des indications des électromètres atmosphériques sur l'état électrique réel de l'air et du globe terrestre. Suivant M. Peltier, le globe terrestre est complétement négatif et l'espace interplanétaire positif; l'atmosphère elle-même n'a point d'électricité, et n'est que dans un état passif, de telle façon que les effets observés tiennent à l'influence relative de ces deux grands magasins d'électricité. Quant à nous, sans discuter pour le moment cette opinion, nous sommes d'accord pour

admettre que le globe terrestre possède, du moins dans sa partie solide, un excès d'électricité négative, et qu'il en est de même des corps placés à sa surface; mais il nous paraît résulter des diverses observations que nous avons rapportées, que l'atmosphère elle-même est électrisée positivement; cette électricité positive provient évidemment de la même source que la négative du globe. Il est probable que c'est essentiellement dans les vapeurs aqueuses, dont l'atmosphère est toujours plus ou moins remplie, qu'elle réside, plutôt que dans les particules de l'air lui-même, mais elle n'en existe pas moins dans l'atmosphère. Telle est la manière la plus naturelle, suivant nous, d'interpréter les résultats que nous venons de décrire, et nous verrons qu'elle trouve une confirmation dans les phénomènes dont il nous reste à parler.

§ 3. Des orages et des phénomènes électriques qui les accompagnent.

Nous venons de voir que lorsque le ciel n'est pas serein, l'état électrique normal de l'atmosphère éprouve des perturbations notables : la formation d'un nuage ou d'un brouillard est toujours accompagnée d'un changement de distribution dans l'électricité de la couche d'air où cette formation a lieu. Il est probable que les électricités positives dont chaque particule de vapeur est chargée se réunissent dans le globule formé par la réunion de plusieurs de ces particules au moment où leur précipitation a lieu. Les globules sont eux-mêmes, comme on le sait, autant de petits ballons sphériques dans lesquels une mince pellicule d'eau sert d'enveloppe à l'air intérieur : or, c'est cette couche d'eau qui possède toute l'électricité positive qui était répartie entre la multitude de particules de vapeur qui ont servi à sa formation. Mais quand les globules sont réunis pour former un brouillard ou un nuage, il ne faut point croire qu'il en résulte que le brouillard ou le nuage soit comme un conducteur métallique dont toute l'électricité est à la surface; les globules, suivant la remarque très-juste de M. Peltier, conservent leur isolement, et par conséquent leur électri-

cité individuelle, et le brouillard ou le nuage ne doit être considéré que comme une agglomération de corps distincts possédant tous leur charge électrique. L'électricité qui enveloppe le nuage extérieurement, loin d'être la totalité de celle dont il est chargé, n'en est donc qu'une très-faible portion, et cette couche électrique extérieure se reproduit après chaque décharge aux dépens de chacun des globules intérieurs qui concourent à former le nuage entier. Il est facile de constater de plusieurs manières que c'est bien ainsi que l'électricité est distribuée dans un brouillard ou dans un nuage : il n'y a qu'à placer un électroscope au milieu d'un brouillard ou d'un nuage poussé par le vent, et on remarque combien la divergence varie avec le passage des flocons et des mamelons opaques. Il faut seulement avoir soin, quand il s'agit d'un brouillard, de ne pas placer l'instrument trop près de terre, parce que les portions basses, trop humides et trop conductrices, perdent leur électricité dans le sol dont elles sont très-rapprochées.

Une autre preuve que Peltier donne de ce mode de distribution de l'électricité dans un nuage est le fait qu'une seule décharge n'ôte point à un nuage toute son électricité, ce qui devrait avoir lieu si celle-ci était toute condensée à sa surface : bien qu'il n'y ait qu'un coup de tonnerre dans un orage limité et formé de nuages agglomérés, on sait que le plus souvent il y a un nombre considérable de décharges violentes et successives. Au reste, il est facile, en disposant convenablement un électroscope, lorsque le ciel est couvert de nuages orageux, de manière qu'il soit à l'abri de toute influence latérale, de s'assurer que les décharges périphériques sont précédées d'une quantité de petites décharges particulières qui ont lieu dans l'intérieur des nuages. On voit, en effet, les feuilles d'or de l'instrument diverger brusquement, et par secousses, sans qu'il y ait d'éclairs ni de tonnerre. Quand les feuilles ont ainsi divergé par intermittence plusieurs fois, un coup de tonnerre se fait entendre, l'éclair va frapper un autre nuage ou le sol voisin ; le calme semble alors se rétablir dans l'électromètre, mais bientôt les mêmes divergences reparaissent, la périphérie du nuage se recharge d'électricité, et une nouvelle étin-

celle en jaillit pour aller frapper le corps le plus rapproché.

Pour bien comprendre les phénomènes électriques des nuages, il faut donc se familiariser avec l'idée des individualités de chacun des globules qui les composent. Ces globules sont eux-mêmes groupés par petits flocons ayant leurs limites et leur sphère d'action comme les globules eux-mêmes; les petits flocons en se groupant forment des flocons plus gros; ceux-ci des mamelons; un certain nombre de mamelons par leur réunion forment une nuelle; et les nuelles à leur tour forment des nuages définis; le groupement des nuages définis forme un *cumulus*, et plusieurs cumulus un *nimbus*[1]. Ainsi ces individualités ont toutes leurs sphères électriques particulières et indépendantes, en équilibre de réactions entre elles et avec la sphère générale extérieure du nuage. Ce n'est qu'en envisageant de cette manière, qui est d'accord avec l'observation, l'état électrique des nuages, qu'on peut concevoir leur puissance énorme d'attraction dans certains cas et d'autres phénomènes qu'ils présentent.

Il est facile de concevoir maintenant comment la pluie ou la neige se trouvent chargées d'une électricité qu'elles apportent avec elles dans leur chute. En effet, chaque goutte de pluie ou chaque flocon de neige doit posséder l'électricité dont étaient chargés les globules du nuage qu'ils ont servi à former par leur agglomération, et cette électricité doit agir par communication ou par influence sur les électromètres.

Les signes électriques qui accompagnent la chute de la pluie ou de la neige, comme ceux que détermine le voisinage d'un

[1] On distingue les nuages eux-mêmes en trois espèces : les *cirrus*, qui ont l'apparence de filaments déliés et qui sont les plus élevés; les *cumulus*, qui sont moins élevés, ont une apparence arrondie et forment ces gros nuages accumulés à l'horizon, qui ressemblent de loin à des montagnes couvertes de neige : les *stratus*, qui sont les bandes horizontales qui se forment au coucher du soleil et disparaissent à son lever. Lorsque les *cumulus* s'entassent et deviennent plus denses, ils passent à l'état de *cumulo-stratus*, qui eux-mêmes passent à l'état de *nimbus* ou nuage pluvieux, lequel se distingue par sa teinte d'un gris uniforme et ses bouts frangés; on ne peut plus distinguer les nuages qui le forment, tant ils sont confondus.

nuage sont tantôt positifs, tantôt négatifs. Cette différence, dans la nature de l'électricité accusée, tient-elle à ce que les nuages ont réellement un état électrique différent ou n'est-elle qu'un simple effet d'influence à distance? Suivant M. Peltier, d'accord en cela avec la plupart des physiciens, il y aurait des nuages positifs et d'autres négatifs; les premiers seraient généralement d'un blanc rosé ou orangé, les seconds auraient une teinte grise plombée ou d'ardoise; ainsi, dans un séjour sur le Faulhorn, M. Peltier observa pendant six journées une chute de neige et de grésil qui était accompagnée, celle de la neige, qui provenait de nuages blancs, d'une forte électricité positive, celle du grésil, qui venait des nuages gris, d'une forte électricité négative. Schübler a trouvé pendant la chute de la pluie presque autant de cas d'électricité positive que de négative, et un grand nombre d'observateurs ont obtenu par l'action directe des nuages sur les électromètres, tantôt des signes positifs, tantôt des signes négatifs. D'un autre côté, M. Quetelet n'a jamais observé d'électricité négative dans quatre années d'observations pendant des brouillards ou des neiges, il n'en a observé que pendant des pluies, soit qu'elles eussent lieu au point d'observation, soit qu'elles en fussent plus éloignées; cependant, sur 30 observations d'électricité faites pendant la pluie, il n'y en a que 6 pendant lesquelles l'électricité était négative, tandis qu'il y en a 24 pendant lesquelles elle était positive. M. Palmieri va plus loin encore; il estime qu'il n'y a jamais de nuages, ni par conséquent de pluies intrinséquement négatifs, et que l'électricité négative qu'on observe et qui est souvent assez durable quand elle accompagne la chute de la pluie, de la grêle ou de la neige, est un effet de l'influence exercée par la forte électricité positive que possède le nuage et la pluie qui en provient. Pour bien analyser la série des phénomènes, nous supposerons une pluie commençant à tomber à une grande distance du lieu d'observation, qui y arrive ensuite sous l'action du vent, et qui le dépasse sans cesser de tomber; voici comment les choses se passent.

Quand la pluie est très-éloignée, les instruments indiquent de l'électricité positive, comme ils le font habituellement,

et presque toujours avec une légère augmentation de tension.

Quand la pluie s'est rapprochée à une certaine distance, on trouve une forte électricité négative qui produit souvent de fortes étincelles au conducteur fixe.

Quand la pluie a atteint le lieu d'observation, on trouve de nouveau une grande quantité d'électricité positive.

Quand la pluie a dépassé l'observatoire, on a de nouveau une forte tension négative.

Enfin, lorsque la pluie s'est suffisamment éloignée, l'atmosphère revient à son état habituel de tension positive.

Entre chaque période, il y a un moment de neutralité de courte durée.

Ainsi donc, en laissant de côté le commencement et la fin du phénomène où l'atmosphère est simplement à son état normal, on distingue trois périodes importantes : 1° celle du *rapprochement* de la pluie qui est négative; 2° celle de la *chute verticale* qui est positive; 3° celle de l'*éloignement* qui est négative.

Pour reconnaître cette loi, il faut qu'on ait une vue étendue depuis l'observatoire, afin que l'on puisse voir l'averse de très-loin, car la distance à laquelle la pluie commence à produire ou à induire de l'électricité négative est très-variable. Quelquefois, à une distance de 30 milles, cette action se manifeste déjà, et d'autres fois elle ne commence que lorsque les premières gouttes atteignent l'observateur. Ces différences proviennent probablement de l'étendue de l'averse et de l'état électrique du nuage dont elle provient.

La pluie occupe donc une région chargée d'électricité positive entourée d'une zone chargée d'électricité négative; en sorte que si la pluie commence et finit au lieu d'observation, on trouve de l'électricité positive seulement, et si elle passe à une certaine distance, sans atteindre l'observateur, c'est l'électricité négative qui apparaît seule. On doit aussi noter que, dans le cas assez fréquent où il tombe simultanément plusieurs averses à quelque distance les unes des autres, le phénomène peut se compliquer beaucoup.

Il faut donc abandonner l'idée de pluies négatives ou neu-

tres, et admettre seulement des périodes séparées les unes des autres par des moments de neutralité. Les nuages négatifs n'existent pas, et l'on observe de l'électricité négative par un ciel serein uniquement dans le cas d'une chute de pluie, de grêle ou de neige, à quelque distance. Les effets sont incomparablement plus énergiques pendant ces trois périodes; c'est alors seulement que les conducteurs donnent de fortes étincelles, et il paraît probable que c'est dans ces circonstances seulement que le phénomène de la foudre peut se produire; en sorte qu'il serait toujours accompagné de pluie ou de grêle.

M. Quetelet, qui a fait pendant plus de dix années consécutives des observations régulières d'électricité atmosphérique, se rapproche beaucoup de l'opinion de M. Palmieri; il croit seulement que ce savant va un peu loin en niant absolument l'existence de nuages chargés d'électricité négative. Du reste, il estime qu'on peut résumer ce qui appartient à l'effet d'un nuage orageux dans sa forme la plus générale en le considérant ainsi qu'il suit : Quand l'air est parfaitement pur, les couches supérieures sont électrisées positivement par rapport aux couches inférieures; et, en considérant la surface de la terre comme étant à l'état neutre, la tension des couches de l'atmosphère croît à mesure qu'on s'élève. Maintenant supposons un nuage électrisé positivement, placé dans une pareille atmosphère, et tâchons de nous rendre compte de ce qui arrive.

D'après l'observation, tout se passe comme si le nuage orageux était entouré d'une couche électrique négative. L'épaisseur de cette couche ne doit pas être partout la même, car la surcharge positive du nuage qui la détermine, ou du moins qui la maintient[1], ne doit pas se trouver également répartie, d'abord à cause de la forme plus ou moins anguleuse du nuage, et puis parce que, dans la partie supérieure du nuage, la surcharge sera refoulée en partie par l'électricité des couches supérieures de l'atmosphère. Cet effet sera d'autant plus prononcé qu'en suivant la périphérie du nuage on se rapprochera

1 M. Quetelet ne prétend point expliquer le fait, il cherche seulement à en concevoir plus facilement les effets.

davantage de sa partie inférieure dirigée vers la terre. Les couches d'air avoisinantes, ainsi que la surface de la terre, seront donc relativement dans un état négatif beaucoup plus prononcé que si le nuage n'existait pas, et la différence sera beaucoup plus sensible que dans le haut du nuage.

Pour un observateur placé à une grande distance du nuage orageux, l'électromètre, élevé au-dessus du sol, donne des signes d'électricité positive, les indications deviennent plus faibles à mesure que le nuage approche, puis elles se réduisent à zéro, et enfin le signe de l'électricité change. L'électromètre accuse de l'électricité négative non-seulement à l'approche du nuage, mais encore pendant le commencement de son passage. Toutefois l'électricité diminue progressivement, passe par 0° et reprend l'état positif quand commence la pluie ; elle retourne à sa première valeur, après avoir passé par les mêmes phases, quand le nuage est assez éloigné pour ne plus exercer d'influence. La sphère d'activité d'un nuage est parfois extrêmement grande et s'étend à plusieurs lieues. Il n'est pas rare de voir des nuages à l'horizon marquer leur présence par des signes d'électricité négative.

Il est évident, du reste, que la largeur de la zone électrique négative et l'intensité de l'électricité qu'on y observe, de même que celle du nuage, doivent dépendre en grande partie de l'état hygrométrique de l'air.

Arrêtons-nous plus spécialement à l'instant où le nuage, surchargé positivement, vient à verser de la pluie, il arrivera que les gouttes, en tombant, porteront à terre l'électricité du nuage, et avec d'autant plus d'abondance que la pluie sera plus forte. Tant qu'il ne tombe que quelques gouttes, cette eau ne tend qu'à paralyser en partie les effets de l'atmosphère négative qui entoure le nuage et qui agit sur l'électromètre. Si l'on observe l'instrument dans cet instant, on pourra être disposé à croire que la pluie est négative. Le changement de signe de l'électricité est, en quelque sorte, graduel. Dans une averse, le changement est presque toujours instantané, et le passage par *zéro* est pour ainsi dire insaisissable.

Dans cet état de choses, tous les observateurs, qui se trouvent

au-dessous du nuage et dans la région où il pleut fortement, doivent observer de l'électricité positive. Sur la lisière de la région où ils sont placés, l'électromètre marque *zéro;* puis il accuse de l'électricité négative plus ou moins énergique. Cette zone négative est elle-même limitée par une ligne où l'électromètre marque une seconde fois *zéro;* et, plus loin, il accuse de l'électricité positive croissante jusqu'à ce qu'on soit en dehors de l'influence du nuage orageux.

Quand le nuage est assez bas pour toucher la surface de la terre, l'électromètre accuse l'électricité du nuage même; l'expérience se fait dans le brouillard, qui, comme l'on sait, donne une électricité positive très-intense. Cependant le nuage, par son contact avec le sol, doit tendre à perdre rapidement son état électrique.

Pour des nuages positifs fort élevés, donnant quelques gouttes d'eau seulement, l'atmosphère négative qui les entoure peut ne pas étendre son action jusqu'à la terre, surtout si la surcharge électrique est faible.

Quand le nuage rencontre des montagnes, il s'y porte d'autant plus vivement que les sommets ont une tension négative plus marquée, et il y adhère, comme les médiocres conducteurs, en cédant successivement son électricité.

Voilà ce qui s'observe sous le rapport de l'électricité *statique*. Consultons maintenant le galvanomètre, et étudions le phénomène sous le rapport de l'électricité dynamique. Quand le nuage approche, et lorsqu'il commence à passer, l'instrument donne en général des indications de courants ascendants : l'électricité du sol se trouve attirée vers le nuage, et quelquefois la poussière est vivement soulevée; mais quand la pluie tombe plus abondamment, le courant devient descendant, l'eau du nuage amène l'électricité positive vers le sol; à chaque coup de tonnerre, ou plutôt à chaque éclair, le courant passe avec plus d'énergie, et l'aiguille du galvanomètre est parfois rejetée avec force contre ses arrêts. Il arrive même quelquefois que l'état magnétique de l'aiguille se trouve altéré d'une manière durable.

Pendant que le nuage orageux s'éloigne, les phénomènes

manifestés par le galvanomètre se produisent dans un ordre inverse.

Avant même l'arrivée du nuage orageux, comme après son passage, le galvanomètre donne des indications prononcées à chaque éclair ou à chaque explosion électrique qui met le nuage en rapport avec le sol. Quelquefois aussi le sens du courant est interverti.

Si l'on supposait le nuage électrisé négativement, il serait facile, d'après ce qui vient d'être dit, de se rendre compte des phénomènes qui devraient se produire; remarquons seulement qu'en général, les nuages orageux sont électrisés positivement. Les nuages qui seraient exclusivement négatifs devraient, toutes choses égales, échapper davantage à nos observations et se trouver dans des régions plus élevées. Ces nuages, en effet, placés entre la terre, relativement négative, et les régions supérieures, fortement positives, doivent se porter vers ces dernières, et leur ascension ne doit s'arrêter que quand il y a équilibre entre les forces électriques et la tendance des nuages à descendre.

Dans tout ce qui précède, nous avons pris le phénomène dans sa forme la plus simple, nous n'avons considéré que l'action d'un seul nuage; mais il sera facile de se rendre compte de ce qui arriverait si plusieurs nuages étaient en présence sans faire partie d'un même système électrique. Supposons, par exemple, deux nuages électrisés positivement et superposés; ils vont agir par influence, et la partie inférieure du nuage le plus élevé sera fortement positive par rapport à la partie supérieure du nuage le plus bas. Ce dernier à son tour sera à l'état négatif dans le haut, et à l'état positif dans la partie dirigée vers la terre; l'état de la couche d'air interposée entre les deux nuages subira également leur influence, et dépendra de l'épaisseur et de l'état hygrométrique de cette couche. Ce sera aussi de ces circonstances que dépendra le passage graduel, ou violent et instantané, de l'électricité d'un nuage à l'autre.

Si les nuages orageux, au lieu d'être superposés, se trouvaient côte à côte et à la même hauteur, ils s'influenceraient latéralement, et l'on s'expliquerait encore les actions qui naîtraient de ces sortes d'influence, dans l'hypothèse de nuages

plus ou moins chargés d'électricité, plus ou moins positifs l'un relativement à l'autre. Ces sortes d'actions entre nuages orageux rendent parfois les phénomènes très-complexes, et font que plusieurs orages peuvent se mêler et donner lieu à de fréquents changements dans les signes électriques et dans le sens des courants. Ajoutons enfin que la nature et la hauteur des nuages jouent nécessairement un grand rôle dans les phénomènes électriques de l'atmosphère.

Après avoir ainsi étudié l'état électrique des nuages, passons aux orages eux-mêmes. Quoique les nuages soient tous doués plus ou moins d'électricité, il faut certaines conditions pour que leur présence donne lieu à un orage. La principale de ces conditions, et peut-être l'unique à la production de laquelle les autres seulement concourent, c'est l'agglomération dans un même lieu d'une quantité aussi grande que possible des globules élémentaires qui constituent le nuage, et par conséquent la présence d'un très-grand nombre de nuages et de nuages très-denses; il est évident qu'il en résulte une grande accumulation d'électricité, puisque chaque globule porte son électricité avec lui. Cette condition est plus facilement remplie en été qu'en hiver, car dans la première des deux saisons il suffit d'un refroidissement de quelques degrés pour déterminer une condensation considérable de vapeurs. Les courants d'air qui amènent dans un même lieu un grand nombre de nuages contribuent avec la première cause à la formation de l'orage: quoique produisant un effet plus prononcé en été qu'en hiver, c'est à eux seuls cependant qu'on peut attribuer les orages d'hiver. On peut au reste diviser les orages en deux classes : les uns sont dus à l'action d'un courant ascendant; les autres sont un résultat de la lutte de deux vents opposés; les premiers ne se montrent que pendant la saison chaude, les seconds pendant l'hiver et en été. Dans nos climats, les orages se forment habituellement en été lorsque la température est élevée, le sol plus ou moins humide, l'air calme et le ciel serein : la terre humide étant fortement réchauffée par les rayons solaires, il en résulte un courant ascendant de vapeurs qui viennent se condenser dans les parties élevées de l'atmosphère ; il peut se produire

alors un nuage dense et volumineux qui est fortement électrisé. Quand les orages se forment ainsi, ils ont lieu ordinairement à l'instant de la plus forte chaleur du jour ; mais ce qui est assez curieux, c'est que, quelquefois dans la même localité, les conditions restant les mêmes, il se produit un orage plusieurs jours de suite, jusqu'à ce que le vent et les circonstances atmosphériques aient changé. Volta a, le premier, signalé cette périodicité qui n'a lieu que pour les orages dus aux courants ascendants, et nullement pour les orages produits par la lutte de deux vents opposés.

La présence des nuages dans l'atmosphère ne donne pas toujours naissance à des orages, mais les nuages orageux ont certains traits distinctifs qui les caractérisent. Parmi ces traits, nous citerons une sorte de fermentation à laquelle ils paraissent seuls être sujets, et qu'ont observée et décrite Beccaria et Forster; on peut, à ce premier trait, ajouter, suivant Beccaria, la manière dont ils se forment et s'agglomèrent. Ces nuages, ordinairement très-denses, s'élèvent rapidement de quelque point de l'horizon; ils sont terminés par un grand nombre de contours curvilignes et nettement arrêtés; ils se gonflent, diminuent de nombre et augmentent de grandeur, tout en restant attachés invariablement à leur première base. Entre eux et l'horizon on aperçoit un gros nuage très-sombre, par l'intermédiaire duquel ils semblent toucher à la terre, et dont la teinte obscure se communique de proche en proche aux nuages élevés; c'est leur surface générale, celle du moins qu'on aperçoit de la plaine, qui devient de plus en plus noire. Des parties les plus hautes de cette masse unique et compacte partent, sous la forme de longs rameaux, les nuages qui, sans s'en détacher, vont graduellement couvrir tout le ciel. Indépendamment de ces rameaux, on aperçoit, çà et là dans l'atmosphère, des nuages légers dont les mouvements sont brusques, incertains, irréguliers, et que Beccaria a appelés *ascitizi*, ou nuages additionnels. Ajoutons que la couche de nuages, qui semble parfaitement unie sur sa surface inférieure, présente sur sa face supérieure de hautes protubérances et de profondes cavités, c'est ce qu'ont remarqué des observateurs qui, du haut de pics très-

élevés, se trouvaient au-dessus des orages. Les nuages orageux, quoique en général soumis à la direction des vents, semblent cependant, dans certains cas, abandonner cette direction pour suivre celle des cours d'eau, et dans d'autres être attirés par les sommets des montagnes.

La hauteur à laquelle peuvent se trouver les nuages orageux n'a pas été déterminée d'une manière bien précise; seulement on peut dire qu'il résulte des observations de Humboldt, de De Saussure et de bien d'autres sur les sommets les plus élevés des Andes, des Alpes et des Pyrénées, qu'il y a de véritables et de fréquents orages à d'immenses hauteurs au-dessus de l'Océan, à plus de 5000 mètres, par exemple. Peut-il y avoir dans les pays de plaine des nuages orageux à une si grande hauteur absolue? Il semblerait qu'on peut répondre affirmativement, du moins d'après quelques observations isolées rapportées par M. Arago; cependant, en général, les hauteurs ordinaires des nuages orageux ne sont pas considérables; on a un exemple d'un nuage orageux d'où la foudre partit, qui n'avait que 8 mètres d'épaisseur et que 28 mètres d'élévation au-dessus du sol : c'était, il est vrai, un cas *minimum* extrême; mais, en général, ces hauteurs varient entre 200 et 2,000 mètres. M. Kaemtz est disposé à croire, d'après un grand nombre d'observations faites sur de hautes montagnes, que les orages ont lieu généralement à des hauteurs bien plus considérables. La divergence qui existe à cet égard entre les météorologistes peut tenir à ce que la région des orages est très-étendue dans le sens vertical, ou, en d'autres termes, à ce qu'il y a une grande distance entre le nuage le plus rapproché du sol et celui qui en est le plus éloigné, parmi ceux qui concourent au même orage.

Lorsque des nuages orageux chargés d'électricité contraire se trouvent dans leur sphère d'activité réciproque, de longues étincelles commencent à éclater, même à de grandes distances: c'est le commencement de l'orage; mais bientôt les attractions et les répulsions provenant de leur état électrique, jointes à l'action des vents qui leur impriment des mouvements de translation et de rotation, rapprochent les nuages les uns des autres, en leur donnant souvent les formes les plus bizarres; et dès

qu'ils sont à une distance convenable de la terre, le bruit des décharges électriques se fait entendre.

Avant d'analyser les phénomènes de l'éclair et du tonnerre, ajoutons que les nuages dont nous venons de décrire la formation ne sont pas les seuls qui donnent naissance aux effets de la foudre, mais que ces mêmes effets se manifestent aussi dans les nuées qui sortent des cratères des volcans. Pline le Jeune, en décrivant la fameuse éruption du Vésuve, de l'an 79 de notre ère, parle de nuées qui s'ouvraient et laissaient échapper de longs sillons de flammes semblables à des éclairs, et, sans nous arrêter à d'autres observations, nous nous bornerons à rappeler l'éruption de 1794, si bien décrite par Hamilton, qui fut accompagnée de nuées orageuses qui lançaient des éclairs suivis constamment de décharges comparables à celles des plus violents coups de tonnerre; cet orage volcanique, formé par la seule influence du volcan, était tellement semblable aux orages ordinaires, que les foudres qu'il lançait produisaient les accidents accoutumés, et que des habitations furent foudroyées. Un nuage, en particulier, fut transporté par le vent jusqu'au-dessus de la ville de Tarente, dont la distance au Vésuve est de 400 kilomètres, et y foudroya une maison. Ce nuage était, en grande partie, composé de cendres qui avaient la finesse du tabac d'Espagne. Des observations récentes de M. Palmieri, sur lesquelles nous reviendrons plus loin, ont jeté beaucoup de jour sur les phénomènes électriques des volcans.

Nous avons déjà signalé l'observation faite par Volta d'une certaine périodicité dans les orages; il paraît que certaines causes locales telles, par exemple, que la configuration du terrain, la direction du vent qui souffle dans une vallée peuvent occasionner la formation d'un orage de préférence à une autre localité. Mais les causes qui déterminent les orages embrassent le plus souvent une certaine étendue de pays, et alors les nuages électriques, d'abord circonscrits, s'étendent en tout sens, et parviennent à couvrir de vastes surfaces. Toutefois une longue série d'observations a démontré qu'il existe une certaine distribution des orages à la surface du globe,

qui change avec les saisons. Un tableau dressé par M. Arago montre que le nombre des orages diminue de l'équateur aux pôles comme la quantité de pluie. Il est même permis d'affirmer, d'après de nombreux documents réunis par M. Arago, qu'en pleine mer ou dans les îles il ne tonne jamais au-delà du soixante-quinzième degré de latitude nord. Quoiqu'il existe un pays (le bas Pérou), situé dans les régions équinoxiales où il ne tonne jamais, c'est cependant dans ces régions en moyenne qu'il tonne le plus. Ainsi, tandis qu'en France, en Angleterre et en Allemagne, le nombre moyen des jours de tonnerre s'élève rarement à vingt, on trouve qu'il s'élève à soixante à Calcutta et à cinquante-trois à Rio-Janeiro. M. Boussingault pense que, dans la zone équatoriale, tous les jours de l'année, probablement à toutes les heures, il se fait dans l'air une continuité de décharges électriques, et il admet qu'un observateur placé à l'équateur, s'il était doué d'organes assez sensibles, y entendrait constamment le bruit du tonnerre. Dans nos climats, les orages n'ont lieu, en général, que dans la saison chaude. Voici un tableau dressé par M. Kaemtz de la distribution des orages dans les différentes parties de l'Europe, suivant les saisons; en représentant par 1,000 le nombre total des orages pendant un certain temps, on en a la répartition suivante entre les quatre saisons:

	Hiver.	Printemps.	Été	Automne.
Europe occidentale. . .	89	177	525	209
Suisse.	4	206	690	100
Allemagne.	14	244	660	82
Europe centrale. . . .	0	157	793	50

M. Arago, en rapportant un grand nombre d'observations, a été conduit à reconnaître qu'il tonne beaucoup moins en pleine mer qu'au centre des continents; il conjecture même qu'au delà d'une certaine distance de toute terre il ne tonne jamais. M. Duperrey est moins absolu; tout en étant porté à admettre la diminution des orages en mer et l'existence de lieux à certaines distances des îles et des continents où il ne tonne jamais, il trouve cependant de nombreuses anomalies. Néanmoins il a

constaté qu'il ne tonne que bien rarement sur la route qui conduit en ligne droite du cap de Bonne-Espérance aux îles de Sainte-Hélène et de l'Ascension ainsi qu'à ces îles elles-mêmes; mais il n'en est pas de même de toutes les autres parties de l'Océan Atlantique, du Grand Océan et de la mer des Indes. Toutefois il résulte de l'ensemble des observations recueillies dans toutes les régions du globe que l'atmosphère océanique est beaucoup moins apte à engendrer des orages que celle du continent et des îles.

Outre les influences générales que nous venons de signaler, on ne peut méconnaître qu'il existe des circonstances locales qui influent sur la fréquence des orages. Ainsi, comme nous l'avons déjà remarqué, il ne tonne jamais au bas Pérou, qui correspond cependant par sa position géographique aux régions où il tonne le plus[1]. D'un autre côté, à la Jamaïque, depuis les premiers jours de novembre jusqu'au milieu d'avril, les sommets des montagnes du Port-Royal commencent à se couvrir de nuages entre onze heures et midi; à une heure, ces nuages ont acquis leur maximum de densité, la pluie s'en échappe par torrents, des éclairs sillonnent dans tous les sens, et enfin le tonnerre fait entendre ses roulements jusqu'à Kingston; vers deux heures et demie, le ciel a repris toute sa sérénité; ce phénomène se reproduit tous les jours pendant cinq mois consécutifs. Ainsi Kingston compte 150 jours de tonnerre par an, tandis qu'il n'y en a que 50 au plus dans les îles voisines et dans les points du continent semblablement placés, d'où résulte que l'influence des montagnes de Port-Royal sur la production des orages semble manifeste. Les régions équinoxiales fournissent quelques autres exemples analogues. Il en existe également dans les régions tempérées. M. Dillwyn croit avoir remarqué que dans les pays de mines il y a moins d'orages que dans les autres, et que notamment dans les pays calcaires. M. Blavier, ingénieur des mines en France, dit qu'il

[1] Il est vrai que cette absence d'orage dans le bas Pérou est accompagnée de l'absence de nuages proprement dits, et de leur remplacement par une vapeur singulière, opaque, permanente, connue dans le pays sous le nom de *garrua*.

est reconnu dans le département de la Mayenne, près de Niort en particulier, que l'existence de certaines masses de diorite grenue ou compacte (*grünstein*), qui renferment beaucoup de fer, éloigne ou dissipe les orages les plus menaçants ; propriété que M. Blavier attribue à l'action conductrice de ces masses de diorite. D'un autre côté, M. Vicat a eu l'occasion de remarquer à Grondone, sur la chaîne des Apennins entre Gênes et Plaisance, l'influence sur la formation des orages d'une riche mine de fer qui semble percer le sol sous forme de pic. Il est rare qu'une seule des chaudes journées de juillet et d'août se passe sans qu'un nuage électrique se forme au-dessus du territoire de Grondone ; ce nuage grossit insensiblement, reste pendant quelques heures comme suspendu sur la mine de fer, puis éclate en se déchargeant sur la mine elle-même.

Il est à regretter que cette influence de la nature du sol sur les orages n'ait pas été jusqu'ici mieux étudiée ; ce serait un grand pas de fait dans la physique terrestre que de découvrir une liaison intime et prononcée entre la nature géologique des terrains et le nombre ou la force des orages. Cette liaison existe très-probablement, et même on a cru s'apercevoir que la nature du sol n'est pas sans influence sur l'étendue superficielle des averses.

Après les détails dans lesquels nous sommes entrés sur les orages considérés dans leur ensemble, examinons de plus près les éléments essentiels qui les caractérisent, c'est-à-dire la production de l'éclair et celle du tonnerre.

L'éclair qui sillonne l'espace compris entre deux nuées n'a qu'une durée qui n'atteint pas un millième de seconde, ainsi que l'a démontré Wheatstone au moyen du même principe par lequel il a réussi à déterminer le temps de la durée d'une étincelle électrique, qu'il a trouvé être inférieur à un millionième de seconde[1]. Il y a cependant une forme d'éclair, celle en boule,

[1] Ce principe consiste à donner un mouvement très-rapide à un disque, sur le fond blanc duquel sont tracés en couleur un grand nombre de rayons. Quand ce disque est éclairé par une lumière permanente ou qui a une certaine durée, les rayons se confondent par l'effet de la durée de la sensation, si du moins ce disque tourne avec une vitesse suffisante. Mais si la lumière éclairante ne dure qu'un instant,

dont la durée est plus grande, comme nous le verrons dans l'instant. Du reste les éclairs se distinguent en trois classes : les éclairs en zigzag, ou de la première classe; ceux de la seconde classe, qui sont larges et diffus, et enfin ceux de la troisième classe, qui affectent l'apparence de boules ou globes lumineux.

Les éclairs de la première classe se présentent sous la forme d'un sillon de lumière mince, resserré, très-arrêté sur les bords, se mouvant en zigzag et pouvant se diviser ou se bifurquer en deux, et quelquefois, mais plus rarement, en trois branches. Ces éclairs se portent en général sur la terre, quoique on les voie quelquefois s'élancer d'un groupe de nuages sur un autre.

Les éclairs de la seconde classe dégagent une lumière qui, au lieu d'être concentrée dans des traits sinueux presque sans largeur apparente, embrasse au contraire d'immenses surfaces. Elle n'a ni la blancheur ni la vivacité de la lumière des éclairs fulminants; souvent sa teinte est d'un rouge très-intense; le bleu et le violet y dominent aussi de temps en temps. Les éclairs de cette classe paraissent quelquefois n'illuminer que les contours des nuages dont ils émanent, quelquefois aussi leur vive lumière embrasse toute l'étendue superficielle des nuages, et, de plus, elle semble sortir de leur intérieur; les nuages semblent alors s'entr'ouvrir. Les éclairs de la seconde classe sont de beaucoup les plus communs; pendant un orage ordinaire il en surgit des millions contre un éclair resserré et sinueux de la première classe.

Les éclairs de la troisième classe diffèrent de ceux des deux premières sous le rapport de la forme, de la vitesse et de la durée. Ils sont visibles pendant une, deux et même dix secondes; ils se transportent des nuages à la terre avec assez de

les rayons paraissent distincts et le disque immobile. Il est facile de déterminer la vitesse qu'il faut donner au disque pour que ce dernier effet cesse d'être produit, et de déduire de cette détermination la durée de la lumière, sachant qu'une ligne lumineuse prend l'apparence d'une surface circulaire continue, quand elle tourne assez vite autour de l'une de ses extrémités pour décrire la circonférence entière en un dixième de seconde de temps.

lenteur pour que l'œil les suive nettement dans leur marche. Les espaces qu'ils embrassent sont circonscrits, nets et définis, et d'une forme à peu près sphérique, ce qui fait qu'on les a nommés éclairs en boule. Ce sont de véritables globes de feu, se divisant parfois, et rebondissant sur la terre à plusieurs reprises; ils ont des mouvements tantôt lents, tantôt rapides, et quelquefois en éclatant ils font entendre un bruit comparable à la détonation de plusieurs pièces de canon. Quoique plus rares que ceux de la seconde classe, on en voit cependant de temps à autre, et M. Arago en cite un grand nombre de cas; c'est en général sous cette apparence que la foudre se présente quand elle pénètre dans l'intérieur d'un édifice. Il est probable que les globes de feu météoriques qui traversent quelquefois l'atmosphère sans qu'il y ait d'orage apparent appartiennent à cette catégorie d'éclairs; mais il ne faut pas les confondre avec les traces lumineuses qui accompagnent la chute des aérolithes.

Les trois formes différentes que peut affecter l'éclair ne sont pas très-faciles à expliquer; elles dépendent très-probablement de la forme des nuages et de leur densité, et par conséquent du degré d'accumulation de l'électricité dont ils sont chargés. Le cas de beaucoup le plus fréquent est celui des éclairs de seconde classe, dans lesquels la décharge paraît se faire entre toutes les particules du nuage avec accompagnement de lumière; cette décharge ressemble tout à fait à celle d'une batterie électrique, dans laquelle l'électricité est fortement condensée; les différentes portions du nuage seraient comme autant de carreaux étincelants, au moyen desquels une forte dose d'électricité serait accumulée; dans l'éclair en zigzag les particules du nuage étant beaucoup plus rapprochées les unes des autres, le nuage ne forme plus qu'une masse compacte, d'où part l'étincelle électrique comme elle part du conducteur d'une machine, cas dans lequel elle a également la forme de zigzag. Cette forme paraît tenir à la résistance que rencontre la décharge dans les couches d'air qu'elle traverse; il est probable, en effet, que les particules d'eau très-divisées jouent dans l'air le même rôle conducteur que celui

que jouent des particules métalliques, de cuivre, par exemple, dont on saupoudre une planche vernie. Dans ce cas, en effet, l'étincelle, au lieu de traverser l'air directement, passe d'une particule à l'autre en formant des sillons de feu; on obtient cet effet d'une manière prononcée en recouvrant d'une couche d'aventurine des tableaux magiqnes. L'aspect de zigzag tient donc à une propagation de l'électricité s'opérant au moyen des particules successives de vapeur disséminées dans l'atmosphère, entre lesquelles l'électricité forme en s'échappant une série d'étincelles suivant une direction plus ou moins sinueuse, à cause de la position et de l'agrégation plus ou moins irrégulières de ces particules conductrices; cette manière d'expliquer le phénomène a été développée par M. Dumoncel qui l'a appuyée de plusieurs expériences intéressantes [1]. La forme globulaire est plus difficile à comprendre; on ne conçoit pas l'origine de cette espèce de ballon lumineux qui chemine dans l'atmosphère, et qui tout d'un coup s'entr'ouvre et se déchire avec une détonation terrible, en lançant dans quelques cas des rayons de foudre en zigzag dans tous les sens. On a vu souvent ces globes de feu, de la grosseur d'une tête d'enfant et comparables à l'apparence de la pleine lune, se promener lentement sur le sol ou à une petite distance au-dessus, jusqu'à ce qu'ils s'échappent par une issue quelconque, telle qu'une cheminée, et qu'ils éclatent en sortant. Cette forme particulière n'est-elle que le résultat de la manière dont l'électricité, due à l'influence du nuage, se propage à travers l'air, ou bien provient-elle d'une masse d'air humide condensée et fortement électrisée, formant comme une espèce de petit nuage arrondi, et mise elle-même en mouvement? C'est ce qu'il est impossible de décider avant que de nouvelles observations aient fait connaître d'une manière plus précise la nature de ce météore. Du

[1] M. Dumoncel regarde l'eau disséminée dans l'air, à l'état de vapeur vésiculaire, comme un conducteur secondaire, c'est-à-dire doué d'une conductibilité inférieure qui permet, quand il est interposé entre deux foyers d'électricité contraire, à la décharge de s'opérer à des distances beaucoup plus grandes qu'à travers l'air ordinaire.

reste, nous reviendrons sur ce sujet dans le dernier paragraphe, où nous nous occuperons de la cause de l'électricité atmosphérique.

A l'apparition des éclairs succèdent ordinairement, après des intervalles de temps plus ou moins longs, des bruits qui, désignés sous le nom général de tonnerre, présentent d'assez grandes variétés entre eux. Quelquefois le bruit du tonnerre paraît clair et sec comme celui d'un simple coup de pistolet; plus généralement il est plein et très-grave. Le tonnerre ne se fait entendre qu'un temps plus ou moins long après que l'éclair a brillé. Il est plus que probable que le bruit et la lumière sont engendrés simultanément; mais la vitesse des sons étant infiniment moindre que celle de la lumière, 337 mètres au lieu de 80 mille lieues par seconde, il en résulte que, pour peu que l'observateur soit un peu distant du nuage où l'éclair a brillé, le bruit du tonnerre ne lui parvient que quelques instants après qu'il a vu la lumière. La propagation de la lumière pouvant être considérée comme instantanée aux distances dont il s'agit, l'observateur, qui aura déterminé avec un chronomètre le nombre de secondes comprises entre l'arrivée de l'éclair et celle du tonnerre, en déduira facilement la distance en mètres du point où le météore s'est manifesté; il n'y aura qu'à multiplier par 337 ce nombre de secondes. On obtient ainsi la distance rectiligne du nuage; mais on peut en déduire sa hauteur verticale en déterminant la hauteur angulaire de l'extrémité de l'éclair la plus voisine de l'observateur. Il y aurait un grand intérêt à avoir des déterminations nombreuses et exactes des intervalles de temps écoulés entre l'éclair et le tonnerre, surtout des plus grands et des plus petits; des premiers, parce qu'ils serviraient à déterminer la plus grande hauteur des nuages orageux; des seconds, parce qu'ils permettraient de résoudre la question de savoir si la détonation, quand la décharge s'opère entre la terre et un nuage, a lieu vers la terre, vers le nuage ou entre deux; question désignée sous le nom de foudres ascendantes et descendantes. Quant au premier point, les plus grandes distances auxquelles le tonnerre se soit jamais fait entendre paraissent

être de 4 lieues de 4,000 mètres, qui correspondent à 48 à 49 secondes écoulées entre l'apparition de l'éclair et le bruit du tonnerre.

Mais le bruit du tonnerre présente deux circonstances caractéristiques qui sont surtout dignes d'attention : d'une part, sa longue durée, de l'autre, les diminutions et les augmentations successives d'intensité qui se renouvellent fréquemment pendant le retentissement d'un seul et même coup; ce qu'on désigne par l'expression heureuse de roulement du tonnerre. La durée du roulement d'un tonnerre observé en pays de plaine et correspondant à un seul éclair peut s'élever jusqu'à 45 secondes et même plus; seulement il faut avoir soin de distinguer le roulement qui accompagne un seul éclair de celui qui provient, comme cela arrive quelquefois, d'une succession non interrompue d'éclairs et de tonnerres. On a attribué ce roulement à l'effet d'échos qui répéteraient le bruit produit par l'explosion unique de la décharge; mais peut-il y avoir des échos susceptibles de donner lieu à des roulements aussi longs que ceux qui accompagnent souvent le tonnerre; et en pleine mer, où il n'existe aucun objet capable de réfléchir le son, on entend également le roulement de la foudre. Il est vrai qu'on peut admettre que les nuages sont susceptibles de réfléchir le son; on en a même quelques exemples; néanmoins la première objection subsiste toujours, et il est difficile d'expliquer uniquement par l'effet de l'écho le phénomène constant du bruit particulier du tonnerre, tout en admettant que l'écho peut quelquefois le renforcer et le prolonger. Le docteur Hooke, qui a établi une relation entre les éclairs simples et les éclairs composés ou multiples et les coups de tonnerre qui les suivent, admet que chacun des éclairs simples n'occupe qu'un point dans l'espace et produit un bruit court et instantané; le bruit qui accompagne les autres est un roulement prolongé, parce que les différentes parties des longues lignes que ces éclairs occupent se trouvant en général à des distances diverses, les sons qui s'y produisent, soit successivement, soit au même instant, doivent employer des temps inégaux pour arriver à l'oreille de l'observateur, et par conséquent n'y parvenir, même

quand ils auraient été engendrés en même temps, que les uns à la suite des autres.

M. Peltier explique le roulement du tonnerre à peu près de la même manière, en l'attribuant aux décharges intérieures successives qui ont lieu entre les nues agglomérées qui composent le *nimbus*, quand l'équilibre électrique qui existait entre elles a été rompu par la première décharge qui a lieu à la périphérie; ces décharges multipliées en tout sens par les nues elles-mêmes, par leurs mamelons et leurs flocons, produisent, vu qu'elles sont successives et qu'elles proviennent de points différents, le roulement et le renflement du tonnerre sans qu'il y ait intermittence; c'est une conséquence de l'isolement, soit de l'individualité de chaque partie élémentaire d'un nuage et de chacun des groupes formés par ces parties, que nous avons déjà vu être admis par Peltier. Cependant nous croyons avec Arago que les décharges dues à un même éclair ne sont pas successives, mais bien simultanées, tout en admettant avec Peltier qu'elles ont lieu dans des parties différentes du nuage.

On peut comparer ce qui se passe dans un coup de tonnerre au bruit qui résulterait d'une file de soldats déchargeant tous leurs armes au même instant; en supposant la file rectiligne et les soldats à un mètre de distance les uns des autres, un observateur, placé à l'une des extrémités de la file, entendrait un bruit qui durerait une seconde s'il y avait 337 soldats, deux secondes s'il y en avait 674, et dix secondes s'il y en avait 3,370. La position de l'observateur influera, il est évident, sur la durée du bruit et sur son intensité, puisque, suivant cette position, il pourra y avoir plusieurs coups simultanés. Si la file est curviligne au lieu d'être rectiligne, il en résultera également des modifications dans la durée du son et dans l'intensité des différents coups dont il se compose. En supposant, par exemple, la file circulaire et l'observateur au centre, celui-ci n'entendra plus de roulement, mais une détonation très-forte, formée de la réunion de tous les bruits des fusils.

Rien n'est plus facile que de comprendre maintenant la liaison qui existe entre les éclats du tonnerre d'une part, et, d'autre

part, la longueur, la forme de l'éclair, ainsi que sa distance et sa position par rapport à l'observateur. En particulier, les zigzags, qui indiquent que l'éclair se replie sur lui-même au lieu de continuer à s'éloigner en ligne droite, doivent correspondre à une augmentation de bruit, laquelle est suivie à son tour d'un affaiblissement brusque si, par une seconde inflexion, l'éclair se trouve amené de nouveau à se mouvoir dans la direction de la ligne visuelle de l'observateur.

L'éclair est donc suivi d'un roulement, parce que les différentes parties dont il se compose sont en général à des distances inégales de l'observateur; la durée de ce roulement étant le temps dont le son a besoin pour parcourir un intervalle égal à la différence en longueur des deux lignes menées aux deux extrémités de l'éclair, on aura cette différence en mètres en multipliant le temps du roulement exprimé en secondes par 337; ce produit correspond au minimum ou à la limite de longueur que peut avoir l'éclair, puisque, pour peu que ce fût sa longueur exacte, il faudrait que la direction de l'éclair fût exactement celle d'une ligne droite horizontale, à l'extrémité de laquelle serait placé l'observateur. En supposant un tonnerre dont le roulement durerait 45 secondes, comme Delisle en a observé en 1712, on aurait, pour l'éclair correspondant, une longueur de 15,165 mètres, soit de près de 4 lieues. En Abyssinie, M. d'Abbadie a trouvé trigonométriquement des éclairs de plus de 6,700 mètres de longueur; M. Petit, à Toulouse, a vu des éclairs dont la longueur atteignait 17,000 mètres.

Quoique l'éclair soit le plus souvent suivi du bruit du tonnerre, il arrive cependant quelquefois qu'il ne tonne pas lors même qu'on voit briller des éclairs, et cela aussi bien par un temps couvert que par un ciel parfaitement serein. On a nommé ces éclairs, qui se montrent sans tonnerre, *éclairs de chaleur*. On les a attribués en général à des orages trop éloignés pour que le bruit du tonnerre puisse parvenir à l'oreille de l'observateur, tandis que la lumière de l'éclair parvient encore à ses yeux. Quand l'atmosphère est parfaitement sereine, c'est à l'horizon que se montrent presque toujours les éclairs de cha-

leur, ce qui semble indiquer qu'ils sont en effet le résultat de la réverbération dans l'atmosphère d'éclairs ordinaires provenant d'orages très-distants, et dont la vue directe est empêchée par la rondeur de la terre. On a pu constater le plus souvent que tel était effectivement le cas, et que des orages lointains, qui avaient eu lieu dans la direction où l'on avait aperçu les éclairs de chaleur, étaient la cause de ces éclairs. Cependant on a vu des éclairs sans tonnerre, par un ciel parfaitement serein, au zénith du lieu d'observation; il est arrivé à quelques observateurs d'apercevoir ces éclairs pendant des nuits entières, et vers tous les points de l'horizon également, sans que le ciel vînt à se couvrir; dans ces cas, il est difficile de ne pas admettre qu'un ciel serein peut être sillonné par des éclairs directs qui jaillissent spontanément dans un air sans nuage. Ne se pourrait-il pas que l'absence de nuages ne fût qu'apparente, c'est-à-dire que les nuages qui donnent lieu à ces éclairs fussent des nuages si élevés et si peu denses qu'ils soient invisibles? C'est à l'existence de ces nuages, que nous avons déjà signalée, qu'on peut attribuer, outre les chutes de pluies qui ont lieu par un ciel parfaitement découvert, les signes de forte électricité que manifestent de temps à autre, dans les mêmes circonstances, les électromètres atmosphériques[1]. Le fait est que l'on ne connaît encore que d'une manière très-imparfaite la manière dont la vapeur aqueuse est distribuée dans l'atmosphère, et qu'il serait bien possible que, dans certains moments, il y eût des parties de l'atmosphère passablement bien limitées qui fussent, par l'effet de diverses causes, telles que des vents contraires ou des courants d'air ascendants, chargées de plus de vapeurs aqueuses que les autres, et formant ainsi des nuages invisibles dont la présence serait quelquefois accusée par la lumière d'un éclair trop éloigné, ou ayant lieu dans un air trop raréfié pour être accompagné d'un bruit sensible. M. Peltier a constaté par

[1] M. le professeur Plantamour cite à l'occasion des observations d'électricité atmosphérique faites à l'Observatoire de Genève, des cas où par un ciel en apparence parfaitement serein, il tirait de fortes étincelles du fil métallique qui communiquait avec la pointe isolée destinée à soutirer l'électricité de l'air.

plusieurs observations d'électricité atmosphérique l'existence de ces nuages invisibles.

Quant aux tonnerres sans éclairs, dont on a quelques exemples, ils sont très-probablement dus à ce qu'au-dessous de la couche de nuages dans laquelle se passe un violent orage, il y en a une autre inférieure, composée de nuages très-opaques qui ne laissent pas passer la lumière des éclairs, quelque vive qu'elle soit. Les relations des voyageurs confirment la supposition que deux couches de nuages superposées peuvent exister simultanément dans l'atmosphère à différentes hauteurs, et un orage se manifester dans la couche supérieure seulement.

§ 4. De la chute de la foudre, des phénomènes qui l'accompagnent, des moyens de s'en préserver. — Paratonnerres.

Nous avons étudié, dans le paragraphe précédent, les phénomènes électriques qui ont lieu pendant un orage, en nous bornant à ceux qui ont lieu seulement dans l'atmosphère; mais, comme nous l'avons déjà remarqué, la terre elle-même participe souvent à ces phénomènes; c'est ce qui a lieu en particulier quand, suivant l'expression consacrée, le tonnerre *tombe* sur la terre. Le mot *tombe* indique que l'éclair, au lieu de jaillir entre deux nuages, jaillit entre un nuage et des corps placés à la surface de la terre; on dit alors que ces corps sont *foudroyés*. Il n'en résulte pas nécessairement que le corps foudroyé ou frappé par la foudre soit détruit, car il y a, comme nous le savons, des corps que la décharge électrique peut traverser sans les altérer ou en ne les altérant que très-peu; ce sont ceux qui, soit par leur nature, soit par leurs dimensions ou leurs formes, ne présentent que peu de résistance à la décharge; mais on conçoit que, comme il s'agit ici de décharges énormes, ces conditions soient beaucoup plus difficiles à rencontrer que lorsqu'il s'agit des décharges de nos batteries, même les plus puissantes. On a beaucoup discuté pour savoir si la foudre tombe du ciel ou si elle s'élève de terre vers les nuages; on a même admis qu'il y a également des foudres *ascendantes* et des foudres *descendantes*;

il est évident, d'après la manière dont nous avons expliqué la propagation de l'électricité par la polarisation et la décharge des molécules successives, qu'il n'y a pas de transport de matière électrique, et que par conséquent la foudre ne peut ni monter ni descendre; mais la disposition et la nature des corps terrestres peuvent influer sur l'apparence de la décharge qui a lieu entre eux et un nuage, de façon que cette décharge paraisse dans quelques cas monter vers le nuage, tandis que dans d'autres elle semble en descendre; nous verrons plus loin des exemples des deux cas[1].

Quand un nuage orageux, et par conséquent fortement électrique, s'approche de la terre, il décompose par influence l'électricité naturelle de toutes les parties plus ou moins conductrices qui sont à la surface du sol. Son action peut s'arrêter là si le vent amène près de lui un autre nuage doué naturellement ou par influence d'une électricité contraire à la sienne; l'explosion a lieu alors entre les deux nuages, et la portion de la surface terrestre dont l'électricité naturelle a été décomposée repasse à l'état naturel[2]. Mais il peut arriver aussi que la décharge ait lieu entre le nuage et le sol; dans ce cas, ce seront les objets les plus rapprochés du nuage, parmi ceux dont l'électricité naturelle a pu être décomposée, qui serviront à transmettre cette décharge, et qui par conséquent seront foudroyés. Ces objets doivent être généralement ceux qui sont le plus élevés au-dessus du sol; cependant il peut arriver que dans quelques cas, comme lorsqu'un nuage orageux est amené brusquement par un vent violent, les objets frappés par la foudre soient ceux qui sont tournés du côté d'où vient le vent, et par conséquent le

[1] Ces différences d'apparence tiennent aussi très-souvent à la manière dont le spectateur est placé, par rapport aux points entre lesquels la décharge a lieu. Ainsi quand on a déchargé le conducteur d'une machine au moyen d'une boule de métal qu'on en approche, l'étincelle semble aller du conducteur à la boule si elle est au-dessus, et de la boule au conducteur si elle est au-dessous; cependant dans les deux cas elle chemine exactement de même; la différence d'apparence est donc une pure illusion d'optique.

[2] Nous verrons plus loin que, même dans ce cas, il se passe un phénomène électrique sur la terre, qu'on a nommé *choc en retour*.

nuage, sans qu'ils soient les plus élevés. L'observation a confirmé de tout temps ces conséquences de la théorie; et, longtemps avant que la théorie de la foudre fût découverte, il était bien reconnu que les lieux élevés, et les clochers en particulier, sont principalement frappés par la foudre.

Mais, quel que soit le lieu où la foudre tombe, elle se porte de préférence sur les corps conducteurs qui s'y trouvent et sur les métaux; rien n'est plus curieux que de suivre sa marche, ainsi qu'on l'a pu faire dans plusieurs cas décrits par M. Arago. Ainsi on voit la foudre enlever en tombant sur une maison toutes les dorures qui s'y trouvent, sans blesser les nombreuses personnes qui sont réunies; on la voit parcourir des tiges et les fils métalliques d'une habitation sans laisser d'autre trace de son passage que la fusion des fils, tandis que les tiges, plus fortes, n'ont éprouvé aucune altération, puis se diviser pour traverser le canon d'un fusil placé contre un mur, qui lui-même reste intact, tandis que la crosse est brisée et le mur percé d'un trou là où se trouvait le bout du canon appuyé contre ce mur. Il suffit de masses de fer, de crampons, de clous disséminés dans des murs pour que la foudre s'y porte, quelquefois, en les arrachant, le plus souvent en opérant dans les murs eux-mêmes des dégâts plus ou moins considérables. Cette tendance de la foudre à se porter en grande quantité sur les métaux, même au travers d'épaisses masses de pierre, explique bien des anomalies apparentes dans les dégâts qu'elle occasionne, et en particulier comment il peut arriver que ces dégâts puissent être quelquefois concentrés dans un seul point, qui n'est ni le plus haut, ni le plus exposé, mais qui est celui où se trouve réuni le plus grand nombre de masses métalliques. Il y a plus; il peut arriver que le métal seul soit atteint sans que les corps environnants le soient : ainsi on cite l'exemple de deux dames dont l'une, étendant la main hors de la fenêtre, eut un bracelet d'or qu'elle portait enlevé par la foudre, sans laisser aucune trace, en n'éprouvant elle-même que de très-légères secousses, et dont l'autre, dans des circonstances semblables, eut son chapeau réduit en cendres à cause d'un mince fil métallique qui dessinait le con-

tour du chapeau, et sur lequel s'appuyait l'étoffe; le chapeau seul fut atteint. Ces effets sont analogues à ceux que détermine une forte décharge artificielle, quand, transmise à travers un fil de soie doré, elle n'enlève que la dorure en laissant le fil intact.

Après les métaux, les corps humides, et en particulier les arbres, sont les premiers atteints par la chute de la foudre; il semblerait que les arbres résineux sont à hauteur égale moins frappés que les autres, ce qui tiendrait à ce qu'ils doivent être moins bons conducteurs, et par conséquent moins susceptibles d'attirer la foudre; cependant il est difficile de tirer d'une manière bien certaine cette conclusion des faits observés jusqu'ici; car ils ne sont ni assez nombreux, ni assez simples pour inspirer une entière confiance dans cette conclusion. Il est évident aussi que l'état particulier dans lequel se trouve l'arbre quant à la nature plus ou moins conductrice du sol sur lequel il repose, la profondeur plus ou moins grande qu'atteignent ses racines, sa force de végétation et par conséquent l'abondance de séve qu'il renferme, sont autant de circonstances qui, indépendamment de sa nature, doivent le rendre plus ou moins propre à attirer la foudre et à la conduire.

Les effets que produit la foudre en tombant sont, sauf qu'ils ont lieu sur une beaucoup plus grande échelle, tous les mêmes que ceux que détermine dans des circonstances analogues une décharge électrique : *effets mécaniques*, *effets calorifiques*, *effets chimiques*, *effets physiologiques*.

Nous avons analysé avec assez de soin les effets mécaniques et calorifiques des décharges en nous servant dans ce but de l'étude si complète qu'en a faite M. Riess, pour qu'il ne soit pas nécessaire d'insister longtemps sur les effets analogues que produit la décharge électrique qui constitue la chute de la foudre. Ainsi le raccourcissement des fils de sonnette; la fusion des métaux, soit totale quand ils sont en fils minces, soit partielle quand ils ont beaucoup de masse; les effets de chaleur plus prononcés partout où il y a des solutions de continuité dans les conducteurs; le brisement et la pulvérisation des mauvais conducteurs, tels que les pierres d'un mur inter-

posées entre de bons conducteurs métalliques; l'inflammation de matières sèches et de peu de densité, telles que des pièces minces de bois, des tas de paille, de foin, etc., sont autant de phénomènes qui accompagnent le passage de la foudre, et qui ne diffèrent que par l'échelle plus grande sur laquelle ils sont produits, des phénomènes semblables que nous avons vu résulter de la transmission des décharges de fortes batteries électriques[1]. Mais parmi ces différents effets, il en est quelques-uns que la chute de la foudre produit d'une manière toute spéciale, vu qu'ils exigent pour leur production une décharge électrique d'une très-grande intensité; aussi doivent-ils fixer un instant notre attention.

Nous avons bien vu que les décharges électriques artificielles peuvent produire des effets mécaniques dans leur passage à travers les corps mauvais conducteurs, comme de percer et de briser une lame de verre; qu'elles peuvent également opérer le transport de particules métalliques réduites à une ténuité extrême, et en particulier détacher des conducteurs, entre lesquels elles ont lieu, une portion de métal très-divisée et excessivement minime, mais cependant appréciable.

M. Fusinieri, qui a fait une étude particulière de cette dernière classe d'effets quand ils sont produits par les décharges électriques ordinaires, a constaté que la foudre renferme toujours diverses matières à l'état de grande division, d'ignition et de combustion; il en a trouvé la preuve dans les dépôts pulvérulents dont demeurent entourées les fractures à travers lesquelles la matière électrique s'ouvre un passage; ces dépôts renferment du fer métallique à divers degrés d'oxydation, du soufre et du charbon. Quoiqu'il soit probable que ces matières proviennent des constructions que la foudre traverse, cependant il est des cas, comme ceux où on trouve des taches ferrugineuses sur des arbres foudroyés en rase cam-

[1] M. Arago, en preuve de l'intensité avec laquelle la foudre agit, cite l'exemple d'une chaîne sur un vaisseau, qui fut entièrement fondue par le passage de la foudre; elle avait 40 mètres de longueur et était composée de tiges successives, tenant les unes aux autres par des anneaux, de 6 millimètres de diamètre et 15 centimètres de longueur chacune.

pagne, où il est difficile de leur assigner une semblable origine. M. Fusinieri se croit autorisé à conclure de ses observations que l'atmosphère renferme à toute hauteur, ou du moins jusqu'à la hauteur des nuées orageuses, du fer, du soufre, du charbon, dont l'étincelle électrique s'imprègne, et qu'elle transporte à la surface de la terre où ils vont former de très-minces dépôts autour des points foudroyés. Mais il nous semble plus naturel d'admettre que c'est du sol d'où les enlèvent les nuages fortement électriques que proviennent ces substances, car on ne les observe que lorsque la foudre éclate entre un nuage et la terre. Quant aux grands effets mécaniques que produit la foudre, tels que renversement de murs, projection au loin de blocs de pierre très-massifs, et autres du même genre, plus ou moins remarquables par les circonstances singulières qu'ils présentent quelquefois, ils sont la conséquence de l'espèce d'explosion que détermine la décharge électrique toutes les fois qu'on l'oblige de traverser les corps mauvais conducteurs, à travers lesquels elle ne peut être transmise qu'en détruisant leur structure moléculaire, c'est-à-dire en les brisant, les fendant ou les faisant éclater. Il arrive quelquefois, quand les corps, tels que des pierres, sont humides, que ces effets sont dus à la force expansive de la vapeur engendrée par la chaleur que dégage la décharge; c'est en particulier ce qui a lieu quand ce sont des arbres qui sont foudroyés. Le plus souvent leurs troncs et leurs branches sont divisés en lattes minces, quelquefois même en filets très-déliés dans le sens des fibres sans aucune trace de carbonisation; mais seulement tous ces débris sont parfaitement desséchés; les filaments restent adhérents à la base du tronc ou sont dispersés dans mille directions différentes; tous ces effets sont évidemment dus au passage de la décharge à travers les portions humides de l'arbre et à la vaporisation de l'eau qui en résulte. Les transports de matière pondérable par la foudre, quelque curieuses que soient les particularités qu'ils présentent dans certains cas, ne sont qu'une conséquence indirecte de la décharge électrique, et on ne saurait déduire, comme on est tenté de le faire quelquefois, de la direction d'un trans-

port opéré par la foudre, le sens du mouvement du météore lui-même. La question des foudres descendantes et ascendantes n'en est plus une, et on ne peut plus conclure, comme le faisaient autrefois les physiciens, qu'une foudre est ascendante, parce qu'elle a soulevé un pavé, tandis qu'elle est descendante, parce que des objets ont été projetés de haut en bas, une fois qu'il est prouvé que toutes ces circonstances sont des effets indirects de la décharge.

Parmi les phénomènes que produit la chute de la foudre, l'un des plus remarquables est la formation, quand elle traverse un sol sablonneux, de tubes vitrifiés qu'on a nommé *fulgurites* ou *tubes fulminaires*. De Saussure sur la cime du Mont Blanc, Ramond sur le pic du Midi, aux Pyrénées, sur le Puy-de-Dôme, Humboldt et Bonpland sur la plus haute cime du Tobuca (à l'ouest de Mexico), avaient observé des traces nombreuses de vitrification sur les roches dont se composent ces sommets, et ils n'avaient pas hésité à les attribuer à la foudre. Il y a plus; il est arrivé des cas dans lesquels on a pu sonder jusqu'à une certaine profondeur le terrain sur la surface duquel la foudre venait de tomber, et on y a trouvé des traces de fusion très-prononcée. Quant aux tubes fulminaires, on en a découvert déjà en 1711 en Silésie, puis plus tard dans différentes parties de l'Allemagne, en Angleterre, au Brésil; les fulgurites sont presque toujours creux; ils descendent ordinairement dans le sable suivant la verticale; ils ont à la surface du sol depuis 1 millimètre jusqu'à 15 millimètres d'ouverture; ils se rétrécissent à mesure qu'on s'enfonce et se terminent souvent en pointe; l'épaisseur de leurs parois varie entre un demi millimètre et 27 millimètres; leur longueur totale atteint quelquefois 8 à 10 mètres; de nombreuses fissures transversales les divisent en fragments plus ou moins longs; la paroi intérieure des tubes est un verre parfait, uni et très-brillant, semblable à l'opale vitreuse. Il est facile de s'assurer qu'une température très-élevée peut déterminer sur du sable semblable à celui où l'on trouve ces fulgurites, des traces de fusion et un émail analogue à celui qui revêt le canal intérieur des tubes. L'origine électrique de ces tubes est d'autant

moins douteuse qu'on a réussi à en produire de semblables, mais de très-petites dimensions, en faisant passer la décharge électrique d'une puissante batterie à travers du verre pilé [1], et qu'on a pour ainsi dire pris la nature sur le fait en en découvrant à l'endroit même où la foudre venait de tomber. Le docteur Fiedler, qui s'est beaucoup occupé de ce sujet, en signale deux cas, et M. Arago cite l'un des plus remarquables, celui qui a été observé par M. le professeur Hagen, de Kœnigsberg, près d'un village, au bord de la mer Baltique. Le tonnerre étant tombé sur un bouleau, on découvrit dans le sol, tout près de l'arbre, deux trous étroits et profonds. M. Hagen fit creuser avec soin autour de ces trous; le premier, qui fut trouvé chaud, n'offrit rien de particulier; le second, jusqu'à la profondeur d'un tiers de mètre, ne présenta non plus rien de remarquable; mais un peu plus bas commençait un tube vitrifié; la fragilité du tube ne permit de le retirer que par petits fragments de 4 à 5 centimètres de long. L'enduit vitreux intérieur était très-luisant, couleur gris de perle et parsemé dans toute son étendue de points noirs. Le docteur Fiedler remarque que, à une certaine profondeur, en creusant dans les plaines de sable où l'on trouve les tubes fulminaires, il existe des nappes d'eau qui déterminent la chute de la foudre sur la surface du sol qui les recouvre, et qui expliquent par conséquent la formation de ces tubes.

La foudre produit des effets chimiques analogues à ceux qu'occasionnent les décharges électriques; parmi ces effets, le plus remarquable est celui auquel est due l'odeur qui l'accompagne. Cette odeur, qu'on a comparée à celle des vapeurs sulfureuses et du phosphore, est celle de l'ozone; et il est facile de comprendre que les fortes décharges électriques, qui constituent la foudre, doivent changer en ozone une prodigieuse quantité d'oxygène de l'air atmosphérique. Il ne faut donc pas aller chercher l'origine de cette odeur ailleurs, et en particulier dans les substances très-divisées que la foudre transporte; d'autant plus que la foudre qui éclate entre deux nuages produit ce même

[1] C'est ce qu'avaient fait en 1823 Savart et quelques autres physiciens.

effet aussi bien que celle qui éclate entre un nuage et la terre, et qu'on l'observe également en pleine mer.

L'air atmosphérique renferme presque constamment de l'ozone à divers degrés d'intensité, et comme, ainsi que nous le verrons plus loin, on a cru trouver à la présence de l'ozone dans l'air quelque influence sur l'état sanitaire, on a imaginé d'apprécier la plus ou moins grande quantité d'ozone qui se trouve dans l'atmosphère, au moyen de la coloration plus ou moins forte qu'affectent des bandes de papier imbibées d'iodure de potassium amidonné, dont on a fait des *ozonomètres*. C'est aussi à la production de l'ozone qu'est due la présence de l'acide nitrique et de quelques nitrates dans l'atmosphère, qui est accusée par l'analyse des eaux de pluies d'orage; en effet, M. Schoenbein a démontré que la combinaison de l'oxygène et de l'azote, qui produit l'acide nitrique, s'opère sous l'influence des décharges électriques par la conversion de l'oxygène en ozone. M. Liebig a découvert la présence de l'acide nitrique dans les pluies d'orage, et M. Barral celle du nitrate d'ammoniaque; ce dernier chimiste, en effet, en analysant mois par mois toutes les eaux de pluie recueillies pendant deux années à l'Observatoire de Paris, y a constamment trouvé du nitrate d'ammoniaque, même pour les époques où il ne tonne que peu ou point à Paris; ce qui, du reste, n'est point contraire à l'origine électrique de ce composé, car il n'y a pas un jour de l'année où il ne tonne quelque part, et les nuages qui se résolvent en pluie, à Paris, ont parcouru des régions dont il ne nous est pas permis de limiter l'étendue. La présence des sels ammoniacaux dans les pluies d'orage doit jouer un rôle important dans l'influence de ces pluies sur la végétation; ne serait-il pas aussi possible, que les nitrières naturelles, qui ne se trouvent que dans certains terrains particuliers, dussent leur origine à la formation de l'acide nitrique par l'électricité atmosphérique? Enfin, la formation de l'ammoniaque par les décharges électriques qui constituent la foudre, indique évidemment que ces décharges opèrent la décomposition de l'eau des nuages; point important sur lequel nous reviendrons plus loin.

La foudre exerce encore, comme les décharges électriques,

une action magnétique très-prononcée et qui a été constatée bien longtemps avant la découverte de l'électro-magnétisme. Déjà, en 1675 et 1681, des navigateurs anglais avaient observé le retournement des pôles des boussoles, opéré par la chute de la foudre sur des vaisseaux. Quelquefois, c'est la destruction complète du magnétisme dans une aiguille, ou même son aimantation dans un sens perpendiculaire ou incliné à la direction ordinaire, qu'opère la chute de la foudre dans son voisinage; effets qui peuvent tous être produits par des décharges électriques artificielles dirigées dans des sens divers en dehors, mais très-près d'aiguilles d'acier de différentes formes, et plus particulièrement en forme de losanges, soit pleins, soit évidés comme l'étaient autrefois les aiguilles de boussoles. Ce n'est pas seulement en modifiant le magnétisme de corps déjà aimantés, que l'action magnétique de la foudre se manifeste, mais aussi en aimantant des masses d'acier ou de fer qui ne l'avaient pas été préalablement; il n'y a rien d'étonnant d'après ce que nous savons des propriétés magnétisantes des décharges électriques. Il est résulté, quelquefois, soit de ce genre d'effet, soit du premier, de très-graves conséquences pour les marins qui, trompés par les fausses indications de leurs instruments, se sont jetés sur des écueils dont ils croyaient s'éloigner à toutes voiles; l'aimantation d'une multitude de masses d'acier, répandues sur un navire, peut créer des centres d'attraction puissants et produire, sans que les boussoles aient été dérangées elles-mêmes, des déviations locales d'autant plus nuisibles qu'en pleine mer le navigateur a peu de moyens d'en constater l'existence et surtout d'en déterminer la valeur. Un autre genre de perturbations, contre lequel le navigateur a aussi à se prémunir, est celui qui résulte de l'aimantation par un coup de foudre des différentes pièces d'acier qui entrent dans la composition d'un chronomètre et particulièrement du balancier. En effet, le magnétisme terrestre influe alors sur la marche de l'instrument, comme M. Duperrey a eu l'occasion de l'observer dans son voyage sur la *Coquille*. Il résulte de là des accélérations ou des retards sensibles qui peuvent, après un certain nombre de jours de navigation, produire sur la détermination

de la longitude géographique des erreurs fort dangereuses. On a l'exemple du paquebot le *New-York* qui, arrivant à Liverpool en mai 1847, après avoir été deux fois frappé de la foudre, avait des chronomètres de 33′,58″ en avance de ce qu'ils auraient marqué si la foudre n'avait pas frappé le bâtiment. Cette aimantation peut durer longtemps; on a trouvé qu'elle avait persisté, pendant vingt-sept ans, dans une montre près de laquelle la foudre avait passé dans sa chute[1].

Il me reste à parler, pour achever l'examen des effets que produit la foudre, de ses effets physiologiques, et en particulier de la mort qu'elle détermine chez les hommes ou les animaux qui sont sur son passage. Cependant il arrive quelquefois qu'ils sont foudroyés sans être tués, mais qu'ils reçoivent des blessures plus ou moins violentes. Souvent les vêtements prennent feu et les victimes portent la trace de brûlures plus ou moins profondes; ces brûlures sont en général des effets indirects de la foudre, car son action directe consiste essentiellement dans une secousse générale qu'elle occasionne dans le corps et qui amène sa désorganisation. C'est surtout dans le système vasculaire que la foudre détermine des lésions par suite desquelles il y a un épanchement du sang et d'autres liquides, qui occasionne instantanément la mort; ce sont ces désordres qui amènent, comme on l'a observé, la putréfaction très-prompte des cadavres dans le cas de morts produites par la foudre; cependant le système nerveux éprouve aussi de grandes altérations, comme nous en verrons de nombreuses preuves plus tard, sans qu'il y ait alors, en cas de mort, accélération de la putréfaction.

La foudre produit sur les corps animés qu'elle frappe des

[1] J'ai observé, en faisant des expériences avec un gros électro-aimant, qu'un chronomètre de poche que je portais sur moi s'arrêtait dès que je m'approchais de cet électro-aimant; je me suis assuré que cet arrêt provenait de l'aimantation qu'éprouvaient les pièces d'accès du balancier à compensation; cette aimantation malheureusement permanente dérangeait notablement l'instrument en occasionnant un retard sensible dans sa marche. Il fallait beaucoup de temps avant que l'aimantation disparût, et le meilleur moyen de la faire disparaître était d'exposer longtemps de suite le chronomètre à une température de 50 à 60°.

effets mécaniques considérables, ordinairement en rapport avec les parties métalliques disséminées dans les vêtements de l'individu atteint; quelquefois les empreintes de la foudre ne sont que superficielles et se réduisent à des échymoses; dans d'autres circonstances, les os eux-mêmes sont brisés. On a signalé un cas dans lequel le crâne d'un homme frappé de la foudre avait été comme broyé par un instrument contondant. On a cité des exemples dans lesquels des coups de foudre, trop peu intenses pour produire la mort, avaient occasionné la surdité ou produit une amaurose avec dilatation et perte de la contractilité de la pupille; ordinairement cette surdité et cette amaurose se dissipent en peu de temps; on les a vues d'autres fois durer plusieurs jours ou plusieurs semaines. Il arrive quelquefois que les coups de foudre, trop peu intenses pour tuer les hommes, ont la propriété de les débarrasser de maladies dont ils souffraient antérieurement; c'est ce que nous verrons dans le chapitre que nous consacrerons aux effets thérapeutiques de l'électricité et dans lequel nous étudierons, d'une manière particulière, l'influence de l'électricité atmosphérique sur l'organisme vivant. Ajoutons encore que la foudre brûle et fait disparaître ordinairement le poil sur toutes les parties du corps de l'individu qu'elle frappe, ce qui tient très-probablement à ce que, vu leur forme, c'est par les cheveux et les poils en général, que s'opère la transmission de l'électricité entre le corps et les objets ambiants.

Nous pourrions citer de nombreux cas de morts produites par la chute de la foudre avec des circonstances particulières que présentaient les cadavres des personnes foudroyées; l'un des plus remarquables est celui d'un homme tué par la foudre à Zante, en 1836, et sur le corps duquel on trouva la marque de pièces de monnaie qu'il avait dans sa poche où elles étaient restées à une assez grande distance de la partie du corps qui avait reçu l'empreinte; effet analogue à celui que Karsten a obtenu avec de simples décharges électriques [1]. En général, l'on diminue la chance d'être foudroyé en temps d'orage en se débarrassant

[1] Tome II, p. 115.

des objets de métal qu'on peut avoir sur soi; il paraît qu'il n'est pas non plus indifférent d'avoir certains vêtements plutôt que d'autres; dans une chute de foudre qui eut lieu le 11 juillet 1819 pendant le service divin sur l'église de Châteauneuf-les-Moutiers, dans les Basses-Alpes, et qui tua raides neuf personnes et en blessa plus ou moins quatre-vingt-deux, deux des trois prêtres qui entouraient l'autel tombèrent gravement frappés, tandis que le troisième, qui était le seul revêtu d'ornements de soie, n'éprouva aucun mal.

Un fait assez important à remarquer, c'est que, lorsque la foudre tombe sur des hommes ou des animaux placés à la suite les uns des autres, soit en ligne droite, soit le long d'une courbe non fermée, c'est aux extrémités de la file que les effets sont généralement les plus intenses. Ainsi, le 2 août 1785 la foudre tomba à Rambouillet sur une écurie où se trouvaient sur une seule file trente-deux chevaux; sur trente qui furent renversés sur-le-champ deux seuls moururent, l'un immédiatement, l'autre peu de temps après; or ces deux chevaux étaient ceux qui occupaient les extrémités de la file. Le 22 août 1808, la foudre tomba sur une maison du village de Knonau en Suisse; cinq enfants lisaient assis sur un banc dans une pièce du rez-de-chaussée; le premier et le dernier tombèrent raides morts, les trois autres n'éprouvèrent qu'une violente commotion. On pourrait multiplier les exemples de cas de ce genre, qui semblent rentrer dans le fait que l'effet des décharges électriques est toujours plus fort là où il y a solution de continuité; mais ce qui est assez singulier, c'est que dans les cas qui nous occupent, les chevaux et les enfants, quoiqu'à la suite les uns des autres, n'étaient pas immédiatement en contact; il est vrai qu'ils étaient assez rapprochés.

Un cas assez rare, mais très-curieux parmi les accidents causés par la foudre, est celui qu'on désigne par *choc en retour*, dans lequel des personnes ou des animaux peuvent être foudroyés à distance d'un nuage orageux; c'est un effet d'influence facile à expliquer. Toutes les fois qu'un nuage est fortement électrisé et qu'une personne se trouve dans sa sphère d'activité, l'électricité naturelle de cette personne est décompo-

sée par influence; celle de nom contraire à l'électricité du nuage est attirée, celle de même nom est repoussée dans le sol; la personne se trouve donc dans un état électrique contraire à celui du nuage. Mais si le nuage vient à se décharger en un point quelconque, par exemple sur un lieu élevé ou sur un arbre, perdant tout d'un coup une grande portion de son électricité, il ne peut plus maintenir dans un état électrique contraire à celui qu'il avait, la personne qui est au-dessous de lui; alors l'électricité de celle-ci se décharge dans le sol subitement, et la secousse électrique qui en résulte peut être assez forte pour donner la mort sans laisser aucune trace visible d'altération dans le cadavre; évidemment dans ce cas l'action a eu lieu sur le système nerveux. Voici un cas de choc en retour cité par Brydone qui est remarquable. Un homme nommé Lauder, qui conduisait une voiture de charbon, fut tué avec ses chevaux sans qu'un autre charretier assis sur une voiture qui suivait la première eût aperçu d'éclair et éprouvé de commotion quoiqu'il eût vu tomber les chevaux; mais dans le même moment une forte détonation s'était fait entendre plus loin; du reste les traces de l'électricité étaient évidentes, car il y avait derrière chaque roue de la voiture dont les chevaux et le conducteur avaient été foudroyés, un trou de cinq centimètres de diamètre, et des fulgurites s'étaient formés sous le sol.

Il n'est pas sans intérêt, avant de s'occuper des moyens de se mettre à l'abri des atteintes de la foudre, de se faire une idée du nombre des personnes qui sont foudroyées annuellement dans différents pays. M. Arago avait essayé de faire cette statistique pour la France, et, malgré que les renseignements qu'il avait pu se procurer fussent très-imparfaits et très-incomplets, il avait trouvé que l'évaluation qui porte à 69 le nombre des personnes tuées annuellement par la foudre en France est trop faible. M. Boudin, qui a publié récemment un mémoire très-intéressant sur le nombre des victimes que fait la foudre et sur les phénomènes qui s'observent chez les hommes et les animaux foudroyés[1], est arrivé, au moyen de documents

[1] Nous reviendrons sur ces phénomènes dans le chapitre consacré à l'application de l'électricité à la thérapeutique électrique.

tirés des archives du ministère de la justice, à montrer que la foudre, dans la courte période de 1835 à 1852, n'a pas tué moins de *treize cent huit personnes* en France, ce qui donne 6 victimes environ par mois en moyenne; il ne s'agit ici que des personnes tuées, et non de celles qui ont été simplement frappées par la foudre. La répartition entre les divers mois de l'année des victimes que fait la foudre ne donne aucune victime pour les quatre mois de janvier, février, novembre et décembre; le maximum est en juin où sur 103 personnes tuées par la foudre dans l'année il y en a 22, et en août où il y en a 19. Le maximum des personnes tuées par un seul coup de foudre ne dépasse pas 8 ou 9. M. Boudin a étendu ses recherches à d'autres pays qu'à la France; ainsi il a trouvé que le nombre des personnes tuées par la foudre est en moyenne, en Belgique, de 3, en Suède de 9,64, et en Angleterre de 22. M. Poey de la Havane, qui a fait des recherches semblables pour les États-Unis et pour l'île de Cuba, trouve pour les États-Unis une moyenne de 21,83 par an, nombre évidemment trop faible, puisque Meriann en trouve 50. Il est clair qu'on ne tient pas compte des cas où la foudre a seulement occasionné des blessures non suivies de mort, ni des cas où elle a incendié des maisons, cas très-fréquents dans certaines parties des États-Unis. Il paraîtrait que les animaux sont en général beaucoup plus maltraités que l'espèce humaine, peut-être cela viendrait-il de ce qu'ils sont réunis en plus grand nombre; M. d'Abbadie rapporte à ce sujet qu'en Éthiopie un seul coup de foudre a tué 2,000 moutons. Très-souvent, d'après la remarque de M. Boudin, il arrive que le berger, le chasseur et le cavalier sont épargnés, tandis que les bestiaux, les chiens et les chevaux sont frappés.

Les dangers que fait courir la foudre sont donc, d'après les considérations qui précèdent, assez grands pour qu'on doive s'en occuper, tant pour éviter les cas de mort, plus fréquents qu'on ne le croit généralement, qu'elle occasionne, que pour mettre les constructions diverses à l'abri des incendies qu'elle détermine dans sa chute. Ces dangers, il est vrai, ne sont pas les mêmes partout; ainsi les accidents provenant de la foudre

sont moins nombreux dans l'enceinte des grandes villes que dans les villages et en rase campagne; ils sont bien plus fréquents sur les lieux élevés que dans les plaines; certaines localités à hauteur égale y sont plus exposées que d'autres. Suivant M. Boussingault, par exemple personne, n'habite volontiers, à cause de la fréquence des coups foudroyants, El Sitio de Tumba Barreto, près de la mine d'or de la Vega de Supia, dans la république de la Nouvelle-Grenade. La Loma de Pitago, dans les environs de Popayan, a la même célébrité. Si le nombre des victimes que fait la foudre n'est pas considérable dans l'enceinte des villes, le nombre des maisons et des édifices frappés et endommagés est au contraire très-grand, ainsi que cela résulte du recensement qu'en a fait M. Arago; il signale les dégâts considérables qui en sont la conséquence, et en particulier ceux qu'occasionne la foudre quand elle frappe des magasins à poudre et des vaisseaux; il cite un grand nombre d'exemples de l'un et de l'autre cas, et il remarque qu'il arrive quelquefois que la foudre, en pénétrant dans les magasins à poudre, disperse la poudre sans y mettre le feu. Ce fait rare cependant, car l'inverse est beaucoup plus fréquent, tient à ce que l'inflammation de la poudre, ainsi que nous l'avons vu, n'a lieu qu'autant que la décharge électrique rencontre dans sa route une certaine résistance qui retarde sa vitesse.

Les hommes, dès les âges les plus reculés, ont donc imaginé des moyens pour se mettre personnellement à l'abri de la foudre. Nous n'examinerons pas ces divers moyens qui n'ont qu'un intérêt purement historique; nous nous bornerons à remarquer que, parmi ces moyens, les uns n'ont aucune valeur, et que d'autres, tels que de ne pas courir, que d'empêcher des courants d'air, etc., ont tout au moins une valeur contestable.

Lors même qu'une enveloppe isolante atténue certainement le danger dont on est menacé, ainsi que le prouve l'exemple que nous avons cité d'un prêtre qui fut préservé de l'atteinte de la foudre par le vêtement de soie dont il était revêtu, cependant on ne peut admettre qu'elle le fasse tout à fait disparaître; en effet, le verre lui-même n'est pas toujours respecté par la foudre,

ainsi que le prouvent plusieurs exemples de carreaux de vitre brisés et réduits en poussière par elle, et même simplement percés de trous très-nets, sans fissures adjacentes. Nous avons déjà dit qu'il vaut mieux éviter d'avoir sur soi des objets métalliques quand on craint d'être foudroyé en temps d'orage; Franklin recommande aussi de ne pas se tenir trop près des cheminées dont la suie peut conduire la décharge électrique, de s'éloigner par la même raison des métaux, des glaces (à cause de leur tain), des dorures; le mieux semble devoir être de se tenir au milieu d'un salon; moins on touche les murs et le sol, moins on est exposé; le plus sûr serait, peut-être, d'avoir un hamac suspendu à des cordons de soie, au centre d'une vaste chambre. Cependant, même avec ces précautions, il peut arriver que, si la foudre ne trouve pas un conducteur continu autour de la chambre, elle s'élance d'un point sur le point diamétralement opposé, et rencontre dans sa course des personnes placées au milieu de la pièce. De nombreuses réunions d'hommes ou d'animaux peuvent augmenter le danger d'être frappé par la foudre, soit en agglomérant en un point donné une plus grande quantité de matière conductrice, soit en déterminant par leur transpiration une colonne ascendante de vapeur dont l'effet est de conduire de préférence la décharge vers le lieu même d'où elle émane; enfin, c'est probablement aussi à un courant ascendant d'air humide qu'on peut attribuer le fait observé assez généralement que les granges remplies de grains et de fourrages sont plus fréquemment frappées de la foudre que les autres bâtiments. Il arrive aussi quelquefois qu'une seule personne est foudroyée au milieu d'un groupe nombreux, et, inversement, qu'une seule personne est épargnée, sans qu'on puisse entrevoir aucune cause extérieure de cette différence qui tient évidemment à ce que, ainsi que l'expérience directe le prouve, il y a des individus qui sont naturellement plus conducteurs de l'électricité que d'autres.

Quoiqu'il soit plus prudent de ne pas se trouver au milieu des nuages d'où les éclairs et la foudre s'échappent d'une manière incessante, cependant un grand nombre d'exemples de personnes qui se sont trouvées dans cette situation, et qui en

sont sorties saines et sauves, montre qu'il n'y a pas toujours danger de mort à traverser de semblables nuages; il est également plus prudent de se tenir, en temps d'orage, à une certaine distance des fils télégraphiques, afin d'échapper au choc des étincelles, qui peuvent dépendre, comme le professeur Henry l'a démontré, des phénomènes d'induction.

Ce n'est pas seulement des individus, mais des habitations, des villes entières, et même de grandes étendues de pays qu'on a cherché à préserver de la foudre par divers procédés. On a d'abord constaté que, lorsqu'un orage passe sur une vaste forêt, il s'affaiblit notablement, ce qui tient à ce que les arbres soutirent aux nuages orageux une partie considérable de l'électricité dont ils sont chargés; on en a au reste la preuve dans la multitude de fentes ou de fissures qu'on y trouve quand on les scie pour en faire des planches ou des madriers, fissures qui proviennent évidemment des coups de foudre qu'ils ont reçus. Cependant les arbres ne sont pas toujours des préservatifs contre les dangers de la foudre, quoiqu'ils le soient le plus souvent; on cite des exemples de maisons frappées quoiqu'elles fussent dominées par des arbres très-rapprochés et beaucoup plus élevés qu'elles, ce qui tient très-probablement, ainsi qu'on l'a pu constater dans plusieurs cas, à ce que le sol sur lequel étaient les arbres était beaucoup moins bon conducteur que celui sur lequel reposaient les maisons. On a longtemps cru que de grands feux allumés en plein air, en soutirant l'électricité aux nuages, ou de fortes et nombreuses détonations d'artillerie, en dissipant les nuées orageuses, étaient des moyens efficaces de préserver les lieux environnants des effets des orages; il paraît que le premier de ces moyens n'est pas tout à fait inefficace; quant au second, les observations recueillies par M. Arago, sur une assez grande échelle, semblent démontrer qu'il est sans aucune espèce d'influence. Il en est de même du fait de sonner ou de ne pas sonner les cloches en temps d'orage; il n'est nullement prouvé, ainsi que cela résulte d'une statistique assez complète, que le son des cloches augmente ou diminue l'imminence du danger des coups de foudre; il faut seulement éviter de mettre les cloches en branle dans l'intérêt des

sonneurs, car le danger qu'ils courent est le même que celui des imprudents qui, en temps d'orage, se réfugient sous de grands arbres. La foudre frappe les objets élevés, et surtout les sommets des clochers ; la corde de chanvre attachée à la cloche, ordinairement imbibée d'humidité, conduit la décharge jusqu'à la main du sonneur ; de là tant d'accidents déplorables.

Après cet exposé rapide des moyens par lesquels on a cherché en divers temps à se mettre à l'abri des atteintes de la foudre, nous arrivons aux paratonnerres modernes, tels que Franklin les a imaginés et qu'ils ont été perfectionnés depuis lui. Leur efficacité que les faits ont confirmée, découle à la fois de l'observation et de la théorie. L'observation a appris que la foudre, en général, se dirige sur les parties les plus élevées des édifices, qu'elle se porte de préférence sur les métaux, qu'une fois qu'elle a pénétré dans une masse métallique, elle ne produit des dégâts qu'au moment de sa sortie et autour des points par lesquels cette sortie s'opère, qu'enfin la terre humide offre à la foudre un écoulement facile qui n'est accompagné d'aucun dégât, quand le métal qui la contient plonge un peu profondément dans le sol. De là découle qu'une maison sera garantie du faîte aux fondations, s'il se trouve dans ses points culminants des pièces métalliques qui du toit se prolongeant sans solution de continuité jusqu'à terre, y aboutissent en s'enfonçant dans le sol toujours plus ou moins humide. Quand il y a sur le faîte d'un édifice plusieurs masses métalliques complétement séparées les unes des autres, il est difficile et même impossible de savoir laquelle de ces masses sera foudroyée de préférence, car le point de départ des nuées orageuses, le sens et la vitesse de leur propagation, doivent avoir à cet égard une influence marquée. Ainsi le meilleur moyen de se tirer d'affaire est d'unir toutes ces masses séparées par des tringles ou des bandes métalliques, de manière que toutes communiquent ainsi avec la base qui aboutit au sol humide.

L'efficacité de ces moyens empruntés à la seule observation explique pourquoi les maisons garnies de couvertures métalliques continues, communiquant avec le sol par l'intermédiaire de conduites d'eau également en métal, sont presque généralement

épargnées par la foudre, tandis qu'il n'en est pas de même des autres; on trouve dans ce fait une explication de la différence si remarquable qui existe entre les villes et les villages, quant au nombre des maisons foudroyées, les maisons des villes étant presque toutes dans la première catégorie et celles des villages dans la seconde. C'est à la même cause qu'on doit attribuer le fait déjà signalé par de Saussure, que les tours de la cathédrale de Saint-Pierre, à Genève, quoique très-élevées et placées sur une éminence de manière à dominer tous les objets situés dans les environs à une grande distance, jouissent depuis près de trois siècles du privilége de n'être jamais foudroyées, tandis que le clocher beaucoup plus bas de Saint-Gervais a été souvent frappé par la foudre. En effet, les tours de Saint-Pierre sont garnies de conducteurs accidentels; celle du milieu en particulier, qui existe depuis près de trois cents ans, étant tout en bois, a dû être recouverte de fer-blanc du haut en bas et sa large base communiquant avec toutes les parties de l'édifice, rencontre de nombreuses pièces métalliques qui elles-mêmes aboutissent à des tuyaux de plomb et de fer-blanc, lesquels pénètrent dans le sol où ils conduisent les eaux pluviales. La grande colonne de Londres, nommée le Monument, élevée en 1677 en commémoration du grand incendie de cette capitale, quoique haute de 62 mètres, n'a jamais été frappée par la foudre depuis qu'elle existe, ce qui tient évidemment à ce que sa partie supérieure se termine par un large bassin de métal garni d'un grand nombre de bandes également métalliques qui, dirigées dans divers sens et étant destinées à figurer des flammes, sont toutes terminées en pointes très-aiguës; le bassin communique avec de grandes barres en fer et par leur intermédiaire avec les mains courantes, également en fer, de l'escalier qui descend jusqu'au sol; tout cet ensemble forme un système conducteur parfait, très-propre à donner un écoulement facile et naturel aux décharges des nuées orageuses qui arrivent dans le voisinage du sommet de la tour. Il serait facile de multiplier des exemples semblables. Concluons-en donc que l'un des meilleurs moyens de mettre un édifice à l'abri de la foudre, c'est de garnir avec soin son toit de bandes

métalliques (fer-blanc, zinc, plomb), en ayant soin qu'il n'y ait point de solution de continuité entre elles, et de les faire toutes communiquer métalliquement avec la terre au moyen de tiges en fer ou même au moyen simplement des tuyaux en fer-blanc, en zinc ou en plomb, destinés à conduire les eaux pluviales dans le sol; seulement il faut prendre la précaution que ces tiges ou ces tuyaux pénètrent assez profondément dans la terre et aboutissent jusqu'aux parties les plus humides [1].

La théorie, quant à l'efficacité des moyens que nous venons d'indiquer, est complétement d'accord avec l'observation. Il est évident que lorsqu'un nuage orageux s'approche d'un objet placé sur le sol, il l'électrise par influence, chassant dans le sol l'électricité de même nature que celle dont il est doué, et lui conservant celle de nature contraire. Quand le nuage est arrivé à une certaine distance de cet objet, les deux électricités opposées tendent à se réunir, et cette réunion s'opère dans l'air, en dehors de l'objet, si celui-ci étant conducteur et ayant avec le sol une bonne communication électrique, l'électricité a pu s'y propager librement et sans obstacle; tandis que si le corps est mauvais conducteur en totalité ou en partie, il sert lui-même de passage à la réunion des deux électricités contraires, accumulées l'une dans le nuage, l'autre par influence dans le sol, et il éprouve en conséquence les dégâts mécaniques et calorifiques qui ont lieu dans ce cas.

Mais la théorie va plus loin; elle a suggéré à Franklin l'idée de placer sur le faîte des bâtiments, pour les préserver de la

[1] Il suffit d'une portion moins conductrice que le reste dans le tuyau, pour annuler ou atténuer l'effet préservatif de cet ensemble de conducteurs. J'en ai moi-même fait l'expérience sur une maison de ferme, dont le toit avait une garniture de fer-blanc qui communiquait avec le sol par un tuyau dont une portion était en terre; la foudre vint frapper un pommeau en fer-blanc placé sur le faîte métallique du toit, mais elle occasionna une forte explosion en laissant des traces de fusion sur le pommeau qu'elle avait troué, et se dispersa dans le sol en brisant la partie du tuyau qui était en terre; il n'y eut pas d'autre dégât; mais il est évident que l'explosion tenait à la résistance que la décharge avait rencontrée dans cette partie du tuyau non métallique; car ayant dès lors (il y a vingt-cinq ans) fait communiquer le faîte métallique du toit avec le sol directement par une tige métallique, l'accident qui avait eu lieu ne s'est pas renouvelé.

foudre, des tiges métalliques pointues passablement élevées, mises en communication avec le sol au moyen de tiges conductrices de dimensions suffisantes pour n'être ni échauffées, ni par conséquent fondues par le passage de l'électricité; c'est cet ensemble de conducteurs ainsi disposés qui constituent les paratonnerres. L'utilité de ces dispositions résulte de l'analyse de ce qui se passe dans l'action préservatrice du paratonnerre; en effet, quand un nuage orageux passe au-dessus d'un paratonnerre, il agit sur son électricité naturelle, et, par son intermédiaire, sur celle de la terre; il attire l'électricité de nom contraire à la sienne qui, s'échappant facilement par la pointe, va neutraliser cette dernière, en même temps que celle de même nom est repoussée dans le sol; le nuage se trouve ainsi, sinon totalement, du moins partiellement, déchargé, et devient par conséquent inoffensif. Mais pour que ce jeu s'accomplisse librement, il faut d'abord que le conducteur communique très-bien avec le sol, sinon il se chargera lui-même de l'électricité de même nom que celle du nuage, et pourra donner lieu à des explosions aussi dangereuses; la forme de pointe donnée à l'extrémité supérieure de la tige a pour avantage d'étendre la sphère d'activité du paratonnerre, parce que l'électricité de nom contraire à celle du nuage pouvant s'écouler beaucoup plus facilement, elle pourra décharger le nuage à une plus grande distance, et par conséquent sur une plus grande étendue. Toutefois la première des deux conditions est beaucoup plus essentielle que la seconde; car si le conducteur est imparfait ou présente quelques solutions de continuité, la foudre, au lieu de le parcourir, risquera de se porter latéralement sur les corps conducteurs voisins, et le paratonnerre deviendra bien plus nuisible qu'utile, puisqu'il aura l'inconvénient d'attirer la foudre sans avoir l'avantage d'en annuler les dangers. Quand le conducteur d'un paratonnerre ne présente une solution de continuité que de quelques millimètres seulement, on voit, à l'approche d'un nuage orageux, une succession d'étincelles brillantes formant comme un torrent de lumière, s'échapper entre les deux portions disjointes du conducteur; mais si l'espace qui les sépare devient plus considé-

rable, les étincelles cessent d'être continues, et elles sont remplacées par une succession de fortes décharges qui risquent de se porter latéralement.

La seconde condition, celle de terminer la tige en pointe, n'est pas indispensable; seulement quand elle n'est pas remplie, c'est-à-dire que la pointe est émoussée ou qu'elle est remplacée par une boule, il arrive quelquefois que c'est par une explosion et non par un courant continu que les électricités de la tige et celle du nuage se réunissent, mais la décharge de la foudre n'en suit pas moins le conducteur jusque dans le sol et ne fait aucun ravage dans l'édifice. Le seul inconvénient qui a lieu dans ce cas, c'est que l'extrémité du paratonnerre éprouve un commencement de fusion qui risque de l'altérer. Au reste, cet inconvénient se présente également et même à un plus haut degré avec un paratonnerre en pointe, vu les petites dimensions de son extrémité, quand un nuage orageux poussé par le vent, arrivant brusquement dans son voisinage, se décharge tout à la fois, et non par l'écoulement graduel de l'électricité contraire émanée de l'extrémité du paratonnerre. Toutefois lorsque les nuées marchent lentement, les paratonnerres en pointe bien construits ont l'avantage d'enlever à celles qui passent dans leur sphère d'activité leur caractère électrique, ainsi que plusieurs observateurs l'ont souvent remarqué.

La construction des paratonnerres a été assez fréquemment l'objet de l'examen des corps savants. L'Académie des sciences en particulier a publié successivement sur ce sujet deux instructions : l'une en 1823, rédigée par M. Gay-Lussac, l'autre en 1854, complémentaire de la première, rédigée par M. Pouillet. Ces instructions entrent dans beaucoup de détails sur les différentes pièces donc se compose un paratonnerre : c'est d'abord la tige supérieure, qui est une barre de fer carrée ou ronde, amincie de sa base au sommet, et qui, pour 7 à 9 mètres de hauteur, a une base de 5 à 6 centimètres de côté. Si la tige est, vu sa longueur, composée de deux parties, il faut que ces deux parties s'emboîtent exactement l'une dans l'autre, et il est bon de souder à l'étain tous les joints, de peur que la rouille en s'y introduisant n'y établisse une solution de continuité. Il

doit en être de même pour les joints des barres de fer de 15 à 20 millimètres d'équarrissage qui, réunies bout à bout, forment le conducteur destiné à unir la base de la tige verticale avec le sol. Le point d'attache, entre cette base et le conducteur, doit être à une certaine distance (10 à 15 centimètres) au-dessus du toit; il s'opère au moyen d'un collier métallique brisé à charnières, qui enveloppe la tige verticale sur une étendue de 5 centimètres, et qui porte deux oreilles contre lesquelles on serre l'extrémité du conducteur hermétiquement. On a soin en général de maintenir le conducteur, dans tout son parcours, à une certaine distance du toit, de la corniche et du mur du bâtiment, au moyen de crampons espacés de distance en distance. Une fois arrivé au sol, le conducteur est conduit à un puits, s'il en existe dans le voisinage où l'eau soit permanente; pour multiplier le contact, on le mène au puits par des tranchées creusées dans la terre, qu'on a soin de remplir avec de la braise de boulanger, qui est très-conductrice et qui préserve le fer de la rouille. S'il n'y a pas d'eau, on cherche un lieu humide et profond, et on y mène le conducteur par une très-longue tranchée dans laquelle on l'enveloppe bien de braise, en ayant soin, pour plus de sécurité, de former des tranchées perpendiculaires à la première et plus ou moins longues, dans lesquelles on fait passer des ramifications du conducteur; au reste il est bon, même quand il aboutit à de l'eau, de l'y faire arriver en le divisant en plusieurs branches.

L'Académie avait recommandé dans sa première instruction de composer la tige supérieure du paratonnerre de trois pièces : une tige en fer surmontée d'une tige en cuivre terminée elle-même par une pointe en cuivre doré ou en platine, afin d'éviter l'altération qu'éprouverait avec le temps une pointe faite avec un métal oxydable. L'instruction de 1854 revient à conseiller une pointe en cuivre rouge, vu que le cuivre étant beaucoup meilleur conducteur de l'électricité que le platine, il s'échauffe moins sous l'action de cet agent et par conséquent risque moins de s'altérer par la fusion, ce qui arrive souvent aux pointes de platine. Il faut également, en vue d'éviter cet inconvénient, quel que soit du reste le métal dont la pointe est faite,

ne pas la faire trop aiguë. Une pointe conique sous un angle de 30° est sous ce rapport tout à fait convenable; il est vrai qu'on perd une partie de l'action par l'influence exercée sur un nuage orageux, mais on gagne d'un autre côté plus qu'on ne perd par la résistance incomparablement plus grande qu'oppose à la fusion et à la désagrégation par la foudre une pointe qui, au lieu d'être effilée, n'est aiguë que dans la limite indiquée. Nous croyons même que sous ce rapport une petite sphère en cuivre rouge doré serait peut-être préférable, car elle résisterait encore mieux aux causes destructrices, et son rayon d'activité ne serait pas beaucoup moindre que celui d'une pointe peu aiguë. Elle aurait aussi l'avantage d'exercer son influence dans toutes les directions, ce qui serait précieux dans les cas, qui ne sont pas rares, où la foudre arrive à frapper les édifices latéralement.

On a admis assez généralement qu'un paratonnerre pouvait défendre efficacement autour de lui des atteintes de la foudre, un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur; aussi applique-t-on cette règle dans la pratique en armant les bâtiments d'un nombre de paratonnerres dépendant de leur longueur et de leur largeur; le même conducteur peut servir à deux paratonnerres, et en général, quand il y a plusieurs paratonnerres sur un bâtiment, il est bon de les rendre solidaires les uns des autres en les faisant communiquer entre eux par des conducteurs. Quant à la règle relative à la hauteur, elle est loin d'être absolue, car elle varie avec la forme de l'extrémité du paratonnerre, avec la nature du bâtiment, etc.

Les vaisseaux ayant été assez souvent foudroyés, tant parce qu'ils sont seuls en pleine mer que parce qu'ils communiquent avec l'eau de mer très-conductrice, on a soin de les munir de paratonnerres. En général, on ajuste à l'extrémité de la flèche, devant le perroquet, une tige en cuivre de quelques décimètres de longueur, y compris sa pointe, et on la fait communiquer au moyen d'un câble en cuivre avec le doublage du vaisseau. Le cuivre est préférable au fer en ce qu'il est beaucoup moins altérable à l'air, et en ce qu'étant plus

conducteur, on peut lui donner une section beaucoup moins grande ; il suffit que le câble ait un centimètre carré de section. M. Harris, qui s'est beaucoup occupé des dangers que la foudre fait courir aux vaisseaux, a conçu l'idée de rendre de forts conducteurs métalliques partie intégrante des mâts et de la coque du bâtiment. Il remplit ce but en incorporant avec les mâts et la cale une série de plaques en cuivre disposées de manière qu'elles se prêtent à toutes les positions variables de la mâture ; elles sont tellement unies entre elles qu'une décharge électrique frappant le navire n'importe en quel endroit, ne puisse pas entrer dans un circuit, quel qu'il soit, dont les conducteurs ne feraient pas partie. Le navire est ainsi préservé de la foudre, sans que les manœuvres en soient gênées et sans que l'équipage ait besoin de s'en mêler d'aucune manière [1].

En terminant ce paragraphe, il nous est impossible de ne pas nous demander si en fait il est bien prouvé que les paratonnerres ont préservé des ravages de la foudre les bâtiments sur lesquels on les avait établis. M. Arago cite quelques cas qui ne laissent aucun doute sur la réponse affirmative qu'on doit faire à cette question. Il existe dans la Carinthie, au château du comte Orsini, une église placée sur une éminence qui était si souvent frappée de la foudre qu'on avait fini par ne plus y célébrer le service divin en été. En 1730, un seul coup de foudre détruisit entièrement le clocher ; après qu'il fut rétabli, le météore continua à le frapper quatre ou cinq fois par an, sans compter les cas d'orages extraordinaires, pendant lesquels cinq ou même dix coups foudroyants atteignaient le clocher dans une seule journée. En 1778, le bâtiment fut reconstruit et muni d'un paratonnerre ; en 1783, d'après Lichtenberg, c'est-à-dire dans un espace de cinq années, le clocher n'avait reçu qu'un coup de tonnerre, et ce coup était tombé sur la pointe métallique sans produire aucun dégât. Depuis sa

[1] Nous regrettons de ne pouvoir pas donner plus de détails sur les travaux aussi intéressants, au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, que M. Harris a faits sur la manière d'établir les paratonnerres sur les vaisseaux, mais ce sujet bien spécial nous entraînerait au delà des limites que nous nous sommes prescrites.

construction, l'église de Saint-Michel à Charlestown était visitée et endommagée par la foudre tous les deux ou trois ans; on y plaça un paratonnerre; dans une période de quatorze ans, à partir de l'établissement du paratonnerre, l'église n'avait plus été frappée. Le clocher de Saint-Marc, à Venise, élevé de 104 mètres au-dessus du sol, était fréquemment atteint par la foudre, ce qui tenait à sa grande élévation, à sa position isolée et à la multitude de pièces de fer qui entrent dans sa construction; il fut armé d'un paratonnerre en 1776; dès lors, il n'a pas été endommagé par la foudre. Aux exemples que nous choisissons, parmi beaucoup d'autres, il faut ajouter ceux qui montrent que lorsqu'au milieu de plusieurs bâtiments semblables il en est qui soient armés de paratonnerres, ces derniers seuls sont ménagés par la foudre dans les mêmes circonstances. M. Harris cite le cas de six églises du Devonshire surmontées de clochers élevés, qui toutes dans le court espace de quelques années ont été frappées par la foudre et dont une seule, la seule qui fût armée d'un paratonnerre, l'a été sans éprouver aucun dommage. C'est surtout dans les vaisseaux qu'on trouve des différences entre ceux qui sont munis de paratonnerres et ceux qui ne le sont pas; ainsi, en 1814, la foudre étant tombée dans le port de Plymouth, un seul vaisseau fut frappé et endommagé; c'était le seul qui, dans ce moment, ne se trouvât pas avoir de paratonnerre.

A côté de cela on cite, il est vrai, des cas de bâtiments armés de paratonnerres, qui ont été détruits ou endommagés par la foudre; mais il n'est pas un de ces cas où l'on n'ait reconnu des défauts de construction de nature à expliquer la cause de l'accident; c'est essentiellement dans l'imperfection des conducteurs et de leur mode de communication avec le sol que se trouvent ces défauts. Ainsi le coup de foudre qui frappa, le 23 février 1829, le magasin à poudre de Bayonne, et l'endommagea si gravement, quoique le paratonnerre dont ce bâtiment était muni eût été construit d'après toutes les règles prescrites dans l'instruction de l'Académie des Sciences de 1823, tenait à ce que la barre métallique, lui servant de conducteur, au lieu de plonger dans l'eau d'un puits ou de se trouver en contact

avec la terre humide sur un grand développement, était soutenue sur toute sa course horizontale à 0m,8 de hauteur au-dessus du sol par des poteaux en bois, c'est-à-dire par des conducteurs imparfaits, et ne s'enfonçait verticalement dans le sol que de 2 mètres environ. On avait, il est vrai, enveloppé l'extrémité de la barre dans du charbon; mais au lieu de la braise éteinte, c'était du charbon ordinaire peu conducteur. Il n'est donc pas étonnant que, ne trouvant pas un écoulement suffisant par la voie qu'on lui avait destinée, la foudre ait suivi la direction des cinq poteaux pour arriver au sol, et qu'elle se soit élancée dans quelques points sur des portions plus humides du mur. En juin 1819, la foudre tomba sur la principale aiguille de la cathédrale de Milan; cette aiguille était armée d'un paratonnerre en bon état, dont le conducteur plongeait dans un vaste puisard; cependant, près de ce conducteur entièrement intact, on trouva à diverses élévations des marbres brisés et dispersés, etc.; le professeur Configliachi constata que le prétendu puisard était une citerne dallée, et qui par conséquent ne communiquait pas avec le sol. La foudre tomba le 4 janvier 1827 sur le paratonnerre du phare de Gênes; ce paratonnerre et le conducteur furent brisés en plusieurs points, mais on découvrit que l'eau dans laquelle plongeait le conducteur était contenue dans une citerne creusée de main d'homme dans la roche sur laquelle le phare repose.

On peut se demander, quand on voit les dangers auxquels on s'expose par quelque négligence ou quelque imperfection dans la construction des paratonnerres, s'il ne vaudrait pas mieux s'en passer que de risquer d'attirer la foudre sans être sûr de pouvoir se préserver de ses atteintes. Il faut remarquer cependant que, lorsque la foudre tombe sur des paratonnerres même imparfaits, elle n'occasionne jamais autant de dégâts que lorsqu'il n'y a pas de paratonnerres. Toutefois nous reconnaissons que peut-être ce qui serait préférable, dans tous les cas, serait de prendre l'habitude de couvrir les arêtes des toits de feuilles de fer blanc, en ayant soin de les faire bien communiquer soit entre elles, soit avec les conduites d'eau, et en prenant la précaution de plonger ces dernières un peu

profondément dans le sol, de manière à établir entre elles et le terrain humide ou de l'eau placée dans le voisinage une bonne communication métallique; des câbles en fil de cuivre sont très-convenables pour cela, et à leur défaut on peut se servir de gros fils de fer.

§ 5. Du rôle de l'électricité atmosphérique dans les phénomènes météorologiques.

Nous avons étudié dans les paragraphes précédents les effets immédiats de l'électricité de l'atmosphère, qui, sous le nom d'éclairs, de tonnerres et de foudre, sont, à l'intensité près, les mêmes que ceux que produisent les décharges électriques artificielles. Mais l'électricité atmosphérique joue dans les phénomènes météorologiques un rôle qui ne se borne pas là; elle est si intimement unie à ces phénomènes qu'il n'en est pas un, pour ainsi dire, où elle ne se montre ou comme cause ou comme effet, ou simplement comme concomitante. La précipitation de la rosée, la formation des brouillards, la chute de la pluie, celle de la neige, sont toujours accompagnées de manifestations électriques; mais c'est surtout dans la production de la grêle, dans l'apparition des trombes, que le rôle de l'électricité se montre d'une manière bien prononcée. Il est également évident dans certains phénomènes lumineux qui, sans avoir les caractères de l'éclair, n'en sont pas moins électriques, ainsi que nous allons le voir par l'examen rapide que nous allons en faire.

Les anciens désignaient sous les noms de Castor et de Pollux une vive lumière dont brillent quelquefois, dans les temps orageux, les portions saillantes des corps, et principalement les parties métalliques. Aujourd'hui ces feux sont plus généralement connus sous le nom de feux Saint-Elme. Ils peuvent acquérir quelquefois d'énormes dimensions, ainsi que cela résulte surtout des récits des navigateurs. En 1696, par le travers des îles Baléares, par un temps très-noir accompagné d'éclairs et de tonnerres épouvantables, Forbin raconte qu'on

vit sur le vaisseau qu'il montait plus de trente feux Saint-Elme ; il y en avait, en particulier, un sur le haut de la girouette du grand mât qui avait plus de $0^m,50$ de hauteur. Un matelot, étant monté au haut du mât, raconta que le feu faisait un bruit particulier qui, d'après la description qu'il en donna, paraît être tout à fait semblable à celui que fait l'électricité quand elle s'écoule dans l'air sous l'influence d'une forte tension. Le matelot, ayant enlevé la girouette, vit immédiatement le feu la quitter pour se porter sur le bout du mât. On cite beaucoup de cas où des militaires, surtout des cavaliers (ce qui tient à ce qu'ils sont plus élevés), ont vu des feux briller à la pointe de leurs lances et de leurs épées. Mais c'est surtout en temps d'orage qu'on voit ces feux au sommet des clochers et des lieux élevés en général. Watson raconte que M. Binou, curé de Plauzel, en France, a observé, pendant vingt-sept années consécutives, que, pendant les grands orages, les trois pointes de la croix du clocher de son église paraissaient enveloppées de flammes. Quoiqu'il y ait par exception des lieux très-élevés qui ne présentent jamais ces apparences, il est probable que c'est au défaut d'observation qu'on doit de les avoir en général si peu remarquées sur les parties saillantes des navires, à la pointe des clochers ou sur les tiges des girouettes et des paratonnerres placés sur le faîte des maisons. Au reste, on en a cependant observé un nombre suffisant pour avoir pu signaler des différences entre ces lueurs, non-seulement quant à leur intensité, mais aussi quant à leurs formes ; ainsi, quoique le plus souvent elles ressemblent à des aigrettes, cependant il arrive aussi quelquefois que leur lumière se trouve concentrée en un petit globe sans aucune trace de jets divergents. Mais ce n'est pas seulement à l'extrémité des objets placés sur la terre qu'on aperçoit des apparences lumineuses en temps d'orage ; il arrive quelquefois que la pluie elle-même possède une lueur phosphorescente. Il en est de même de la neige et de la grêle ; mais c'est la neige qui, de ces trois formes de précipitation aqueuse, paraît présenter le plus fréquemment ce phénomène, lequel du reste ne tient point à la nature aqueuse des précipitations, mais bien à ce qu'elles sont chargées d'électricité ; car la

poussière fine qui tombait sur la ville de Naples, pendant l'éruption du Vésuve de 1796, éruption accompagnée des effets électriques si remarquables que nous avons déjà signalés, émettait une lueur phosphorique pâle très-visible de nuit. De même, le fameux brouillard sec de 1783, qui couvrit presque toute l'Europe et qui très-probablement avait une origine volcanique, répandait la nuit une lumière qui permettait de voir les objets à une certaine distance, et qui s'étendait également sur tout l'horizon. On a aussi observé plusieurs cas de brouillards ordinaires qui sont phosphorescents, en Irlande en particulier. Les nuages eux-mêmes peuvent être quelquefois lumineux d'une manière continue; c'est surtout dans les nuits d'hiver et par les temps neigeux que cette apparence lumineuse se montre; les nuages, chargés de neige probablement, répandent dans tous les sens une lueur rougeâtre, sans limites définies, mais assez intense pour que, suivant Beccaria, elle permette de lire des livres imprimés en caractères ordinaires. La propriété électrique de la neige est, en effet, si prononcée que non-seulement, comme nous l'avons vu, les électromètres atmosphériques se chargent très-fortement dans les averses de neige, mais que souvent les personnes qui se trouvent au milieu de ces averses deviennent elles-mêmes un foyer d'électricité. Cette électricité se manifeste non-seulement par une lueur, mais par un bruissement particulier; ainsi Brewster cite le cas de deux voyageurs anglais qui, surpris dans leur descente de l'Etna par une forte averse de neige accompagnée de violents coups de tonnerre, entendaient un bruit sifflant toutes les fois qu'ils tenaient le bras en l'air et en ne laissant ouvert qu'un doigt de la main; mais en déplaçant le doigt à travers cette atmosphère neigeuse dans divers sens et avec rapidité, ils pouvaient à volonté engendrer une grande variété de sons musicaux dont l'intensité était telle qu'on les entendait parfaitement à la distance de treize mètres. Il est très-probable que le phénomène si remarquable, connu sous le nom d'aurore boréale ou d'aurore polaire, provient également des décharges électriques lumineuses qui ont lieu entre les particules glacées suspendues dans l'air à de grandes hauteurs où elles

forment de très-légers nuages. Mais comme le phénomène de l'aurore boréale est intimement lié avec la direction et les variations de l'aiguille aimantée, ce qui semble établir entre ces deux ordres de faits une dépendance mutuelle, nous renvoyons ce que nous avons à en dire au chapitre suivant qui est consacré à l'étude du magnétisme terrestre[1]. C'est aussi aux particules glacées qui, suspendues dans les hautes régions de l'atmosphère forment les *cirrus*, que doit être attribué un rôle important dans la formation de la *grêle*.

On désigne sous le nom de grêle la chute de petites masses d'eau glacée très-compactes auxquelles on donne le nom de *grêlons*; ces grêlons ont à peu près la grosseur d'une noisette; ils sont souvent plus volumineux, souvent aussi ils le sont moins, et quand ils sont petits (de 2 à 4 millimètres de diamètre seulement), on les désigne sous le nom de *grésil;* ils ont évidemment la même origine, et le grésil ne doit pas être plus distingué de la grêle que l'on ne distingue la fine neige, qui dans les jours froids de l'hiver flotte quelquefois dans l'atmosphère, des larges flocons qui tombent dans les jours humides. Les grains de grésil sont opaques, souvent assez creux, et d'une blancheur semblable à celle de la neige; les plus gros sont quelquefois entourés d'une légère couche de glace; ils tombent en général en hiver et au printemps et rarement ils accompagnent les orages. Les grêlons, au contraire, ne tombent que dans les orages; leur chute est toujours accompagnée de manifestations électriques considérables dans l'atmosphère. Ils sont composés d'un noyau neigeux entouré toujours d'une couche de glace plus ou moins épaisse, transpercée quelquefois elle-même çà et là de petits flocons neigeux. La véritable forme des grêlons n'est pas sphérique; c'est plutôt celle d'une poire, et il est probable que la forme pyramidale est leur forme primitive. On a souvent dit que la couche de glace qui recouvre le noyau neigeux est formé de

[1] Nous ne parlons point ici de la phosphorescence ordinoire, qui est probablement un phénomène électrique, ainsi que nous l'avons remarqué (t. II, p. 273); mais la théorie de la phosphorescence n'est pas encore assez avancée pour que nous puissions classer les faits qui s'y rapportent dans ceux qui dépendent exclusivement de l'électricité.

couches concentriques, ce qui indiquerait une formation successive; cependant quelques physiciens, et notamment M. Boisgiraud, qui a décrit avec soin un violent orage de grêle dont il avait été témoin, n'a pas pu trouver la moindre trace de couches concentriques dans les nombreux grêlons qu'il a soumis à un examen minutieux, ce qui semble indiquer qu'ils sont formés d'un seul jet; d'autres physiciens affirment par contre avoir reconnu dans la masse congelée qui entoure le noyau, des couches distinctes, tantôt transparentes, tantôt alternativement transparentes et opaques; mais ils reconnaissent qu'il existe des grêlons où cette structure ne se retrouve pas et où elle est remplacée par une structure rayonnante à partir du centre. D'un autre côté, tous les grêlons examinés ont un noyau neigeux d'un diamètre variable, et plusieurs d'entre eux présentent, en outre, de petits noyaux semblables, mais de 3 millimètres de diamètre seulement, qui sont enchâssés dans la partie extérieure et transparente des grêlons; cette circonstance, jointe à l'aplatissement fréquent du noyau neigeux central et à la réunion intime de plusieurs grêlons en un seul, semble indiquer que ces grêlons ont été liquides ou tout au moins mous. Nous reviendrons sur cette observation importante. Ajoutons que l'extérieur des grêlons est très-anguleux; plusieurs présentent des pointes aiguës de deux centimètres de longueur et même plus. M. Boisgiraud a trouvé dans l'intérieur de quelques-uns des grêlons qu'il a examinés une matière grise et pulvérulente; ce fait paraît bien établi, quoiqu'il ait été contesté, mais il est fort rare.

La grosseur des grêlons est très-variable; M. Boisgirand, dans les chutes de grêle qu'il a observées, en a trouvé qui, dépouillés de leurs aspérités, avaient les dimensions d'un bel œuf de poule; mais c'étaient les plus volumineux. M. Olmsted dit qu'en Amérique il en tombe tous les ans qui sont plus gros que des œufs de poule. Ordinairement cependant les plus gros grêlons ne dépassent pas la grosseur d'un œuf de pigeon. Différents physiciens citent le cas de grêlons qui pesaient de 102 à 130 grammes; on prétend qu'il en est tombé à Constantinople, en 1831, qui pesaient 500 grammes; on a même parlé

de grêlons du poids de 2 kilogrammes. Mais il faut faire attention que ce sont très-probablement des grêlons agglutinés qu'il ne faut pas confondre avec le grêlon simple.

Il serait très-intéressant de connaître exactement la température des grêlons au moment de leur chute; M. Pouillet, qui est le seul observateur à notre connaissance qui y ait songé, a trouvé que cette température était comprise entre $-\frac{1}{2}$ et $-4°$ au-dessous de 0°; on peut donc affirmer que leur température est très-peu inférieure à celle de la glace fondante.

La grêle tombe à toutes les heures du jour et il n'est point exact qu'il n'en tombe point la nuit; mais il résulte des relevés faits par M. Kaemtz, sur les grêles tombées en Allemagne et en Suisse, que c'est un peu après midi et vers le moment de la plus forte chaleur du jour, que la grêle tombe le plus fréquemment, particulièrement au printemps et en été. C'est en effet en été, du moins dans l'intérieur de l'Europe, que tombe la plus grande partie, la moitié au moins du nombre total des grêles. En Angleterre, au contraire, le nombre des grêles d'été est très-petit; en France, c'est au printemps que le grésil, connu sous le nom de *giboulées*, est très-fréquent; mais les grêles proprement dites y sont comme dans le reste de l'Europe centrale, plus fréquentes en été.

L'influence des localités sur la fréquence de la chute de la grêle paraît incontestable, cependant on n'a encore à cet égard que des notions vagues. Plusieurs physiciens, et entre autres M. de Buch, sont disposés à croire que la grêle n'est pas aussi commune dans les régions élevées que dans les basses. Cependant M. de Saussure, pendant son séjour de treize jours, sur le sol du Géant, à la hauteur de 3,428 mètres, fut frappé de la fréquence de la grêle et du grésil, qu'il observa onze fois. On trouve beaucoup de grêlons sous la neige qui recouvre la cime du Mont Blanc. Ces faits et d'autres encore nous prouvent qu'il tombe souvent sur le sommet des Alpes, sinon toujours de la grêle proprement dite, du moins du grésil qui se transforme dans sa chute quelquefois en grêle et souvent en pluie, suivant la température. M. de Charpentier, d'après de nombreuses observations faites à Bex, est tout à fait disposé à regarder les larges

gouttes de pluie qui tombent pendant les orages comme des grêlons fondus.

Il paraît qu'il en est de même dans les régions tropicales, et que la rareté des grêles dans les plaines tient à ce que les grêlons fondent aussi dans leur chute, car la grêle devient plus commune à 5 ou 600 mètres de hauteur, suivant les observations de M. de Humboldt et de quelques autres voyageurs. Il tomba, le 17 août 1830, une grêle tellement abondante à Mexico, que dans les rues de la ville les chevaux en avaient à mi-jambe.

Indépendamment de la hauteur absolue et de la latitude, il résulte de bien des observations que diverses circonstances locales, telles que la configuration du sol, influent sur la fréquence des chutes de grêle; ainsi certaines contrées sont souvent ravagées par la grêle, tandis que d'autres très-voisines ne le sont que très-rarement. En Suisse, on a observé que les vallées qui vont de l'est à l'ouest, telles que le Valais et le canton de Glaris, restent un très-grand nombre d'années sans être atteintes par le fléau. Suivant M. Despine, qui a fait un relevé très-exact de toutes les grêles tombées pendant l'année 1840 dans les États du roi de Sardaigne, la direction de la grêle est subordonnée dans chaque localité aux chaînes de montagnes qui les dominent; mais toutes les fois qu'elle a frappé le même jour plusieurs provinces souvent très-éloignées et situées sur les deux versants des Alpes et des Apennins, elle a constamment suivi une ou plusieurs lignes dirigées du sud-ouest au nord-est. En général, la grêle est surtout commune à l'ouverture des vallées, là où elles se confondent avec le pays appelé la plaine, par opposition avec les hautes Alpes. Ainsi Borgofranco, au débouché de la vallée d'Aoste, est dévasté par la grêle presque tous les ans, et de Saussure avait remarqué déjà que les contrées situées à quelque distance des hautes montagnes sont affligées par ce fléau plus souvent que celles qui sont placées au pied même des Alpes ou à une grande distance des montagnes. Il est évident que le réchauffement inégal des différentes parties d'une vallée et les courants d'air qui en résultent, ont ainsi que la direction des vents, soit locale, soit générale, une grande influence sur la fréquence des chutes de grêle; aussi

cette fréquence est-elle beaucoup plus grande dans les pays de vallées profondes où des différences de température considérables peuvent s'établir, et beaucoup moindre dans les pays de plaine; la grêle est, à ce qu'il paraît, plus rare en pleine mer où des courants d'air continuels rétablissent l'équilibre de température dès qu'il est rompu.

Quoique le plus souvent les orages de grêle soient très-limités, il est des cas cependant où ils s'étendent très au loin, mais même dans ces cas exceptionnels c'est en longueur et non jamais en largeur que l'averse de grêle a ses plus grandes dimensions. L'un des cas les plus remarquables est celui du fameux orage de grêle qui traversa la France et la Hollande le 13 juillet 1788; il se propagea simultanément sur deux bandes à peu près parallèles dirigées toutes les deux du sud-ouest au nord-est. La première, plus étroite, avait pour largeur moyenne deux lieues et quart; la seconde, pour largeur moyenne trois lieues; elles étaient séparées par une bande qui ne reçut qu'une pluie abondante et dont la largeur moyenne était de cinq lieues et un quart. Il y avait aussi beaucoup de pluie à l'occident de la bande occidentale et à l'orient de la bande orientale. Sur une longueur de plus de cent lieues pour chaque bande, il n'y eut aucune interruption dans l'orage, et même il paraît qu'il couvrit encore plus de cinquante lieues au sud-ouest et de cinquante lieues au nord-est, ce qui donne à chaque bande une longueur totale de deux cents lieues, soit d'environ 1,000 kilomètres. Dans cette immense étendue, tous les points ne furent pas frappés à la fois, mais on reconnut que l'orage avait eu une marche très-rapide depuis les Pyrénées où il avait pris naissance, jusque dans la Baltique où l'on en perdit la trace; sa vitesse était de seize lieues et demie à l'heure environ. Dans chaque lieu la grêle ne tomba que sept à huit minutes; les grêlons différaient en forme et en dimension[1].

On voit par cet exemple que si les orages de grêle sont

[1] Les ravages que causa cet orage furent considérables, comme on le conçoit; il y eut en France 1039 paroisses dévastées, et le dommage qu'elles éprouvèrent fut évalué à 24,690,000 francs.

plus rares dans les pays de plaine, ils y sont en général bien plus étendus que dans les pays de montagne où les grêles, plus fréquentes il est vrai, sont beaucoup plus locales. Ainsi l'un des plus forts orages de grêle bien observés est celui du 23 août 1850, dans lequel, d'après des renseignements recueillis avec beaucoup de soin par M. Blanchet, la colonne de grêle, partie du sommet du Jura vers trois heures de l'après-midi, arriva à Fribourg à quatre heures et demie, après avoir parcouru dix-huit lieues dans une heure et demie, en se dirigeant du sud-ouest au nord-est. D'après M. Blanchet, la grêle, dans le canton de Vaud, ne se forme jamais du côté de l'est; elle vient ordinairement de l'ouest, et elle descend en général d'une sommité située entre deux vallées.

Ajoutons encore aux phénomènes qui caractérisent la chute de la grêle, un bruit particulier qui la précède, qui n'est ni celui du vent ni celui du tonnerre, mais qui est un bruissement semblable à celui qui résulterait ou du choc des grêlons les uns contre les autres ou de l'émission d'une forte charge d'électricité sous forme d'aigrette[1]. Ce bruit, joint à l'entassement des nuages et à la présence parmi ces nuages accumulés et d'une couleur foncée, de quelques nuées blanchâtres, sont des précurseurs infaillibles de la chute de la grêle, le tout nécessairement accompagné d'éclairs et de tonnerre, car les orages de grêle sont caractérisés par la rencontre habituelle de tous les éléments ordinaires des orages, indépendamment de ceux que nous venons de signaler et qui leur sont propres. Remarquons cependant que le tonnerre, qui se faisait entendre avant le bruit dont nous venons de parler, s'amoindrit, et cesse même le plus souvent quand ce bruit commence, ce qui semblerait bien prouver que le bruissement est dû à l'émission de l'électricité.

Après avoir analysé comme nous venons de le faire toutes les circonstances qui précèdent et qui accompagnent la chute de la grêle, et indiqué même quelques-unes des conditions essentielles pour la production de ce phénomène météorologi-

[1] On a comparé ce bruit à celui d'un troupeau de moutons qui galopent sur un terrain rocailleux.

que, essayons d'en rechercher la cause, soit celle qui détermine sa formation, soit celle qui influe sur la direction qu'elle suit dans sa chute.

La première théorie un peu satisfaisante qui ait été proposée est celle de Volta; l'illustre physicien explique la production du froid nécessaire pour la formation du noyau du grêlon par l'évaporation de l'eau de la surface supérieure d'un nuage très-dense, évaporation favorisée par la sécheresse de l'air des régions supérieures de l'atmosphère, par l'état électrique du nuage et par les rayons solaires qui frappent la surface du nuage. Mais, sauf l'influence de la première cause, qui à elle seule est loin de suffire pour expliquer le froid produit, celle des deux autres est très-contestable. En particulier comment concevoir, ainsi que Bellani l'a fait remarquer le premier, que les rayons solaires, en produisant une évaporation plus rapide, augmentent l'abaissement de la température? car s'ils favorisent l'évaporation, c'est parce qu'ils réchauffent l'eau; il faut, pour qu'elle produise du froid, que l'évaporation soit déterminée par d'autres causes que par la chaleur. Puis, si l'action des rayons solaires est nécessaire pour la formation du grêlon, comment expliquer les grêles qui tombent de nuit ou de grand matin? Les noyaux des grêlons une fois formés, Volta suppose que deux nuages chargés d'électricité contraire sont disposés l'un au-dessus de l'autre et que les grêlons très-froids, mais encore très-petits, tombent sur le nuage inférieur, où pénétrant jusqu'à une certaine profondeur, ils se couvrent d'une couche de glace, puis, s'électrisant de l'électricité même du nuage, sont repoussés par lui et attirés en même temps par le nuage supérieur; remontant alors contre leur propre poids, ils arrivent au nuage supérieur où ils éprouvent deux effets analogues; retombant encore de nouveau dans le nuage inférieur, ils sont de nouveau repoussés dans le supérieur, faisant ainsi un grand nombre de fois *la navette* comme dans l'expérience des boules de sureau, qui prennent un mouvement rapide de va-et-vient entre deux disques de métal doués d'électricités contraires. Bientôt les grêlons devenant trop gros et les nuages perdant leur électricité, la cause qui maintient la grêle

suspendue au milieu des nuages est insuffisante, et on voit celle-ci tomber instantanément presque en masse. Mais comment admettre que deux corps ayant aussi peu de densité que deux nuages puissent servir de supports à des boules oscillantes aussi pesantes que les grêlons, une fois surtout qu'il est reconnu que la danse électrique des boules de sureau ne peut plus avoir lieu quand on remplace le disque de métal inférieur par une nappe d'eau? Comment se pourrait-il que la puissance électrique d'un nuage fût capable de soulever des masses de glace pesant quelquefois jusqu'à 200 et 300 grammes? Ne serait-il pas bien plus naturel de supposer, dans ce cas, que les deux nuages se porteraient l'un vers l'autre ou qu'une décharge électrique aurait lieu entre eux? D'ailleurs le mouvement oscillatoire hypothétique de Volta n'a jamais été aperçu par les observateurs qui se sont trouvés au milieu des nuages de grêle.

M. Peltier estime que l'influence électrique qui, suivant lui, favorise considérablement l'évaporation, suffit pour expliquer le froid nécessaire à la formation du grêlon; il admet que lorsque deux nuages chargés d'électricité différente sont en présence et qu'ils sont tenus à distance par leur légèreté spécifique, il s'établit un rayonnement électrique entre eux, rayonnement ou transmission d'électricité qui, ne pouvant s'opérer sans transport de matière, entraîne les molécules d'eau en les faisant repasser à l'état de vapeur. Cette nouvelle évaporation, produite par la puissante action électrique des deux nuages en présence, prend à l'eau de la surface de chaque nuage la chaleur qui la maintient à l'état liquide, de sorte que les portions en regard des deux nuages sont converties en flocons neigeux qui se recouvrent par le jeu de navette de couches d'eau, dont une partie, en se vaporisant par l'effet de l'électricité qui en sort, fait congeler la portion qui reste. Comme on le voit, la théorie de M. Peltier se rapproche beaucoup de celle de Volta, sauf en ce qui concerne la cause du froid, qui, suivant M. Peltier, réside uniquement dans l'évaporation produite par l'émission de l'électricité; mais, malgré quelques expériences qui montrent en effet qu'un liquide s'évapore plus

vite quand il rayonne de l'électricité et que même sa température s'abaisse, il nous semble impossible d'expliquer par cette cause, qui est plus mécanique que physique, l'abaissement énorme de température qui est nécessaire pour la congélation de l'eau qui forme les grêlons.

Essayons maintenant de nous rendre compte, sans recourir à des hypothèses du genre de celles de Volta et de Peltier, de la formation de la grêle. Remarquons d'abord que, dès le matin des jours de grêle, le ciel a un aspect particulier; le bleu n'est pas aussi foncé qu'il l'est pendant un jour parfaitement serein, et on y remarque des *cirrus* filamenteux plus ou moins développés, ce qui indique la présence, dans le haut de l'atmosphère, de petites particules glacées; présence confirmée par l'apparition fréquente de couronnes et de parhélies. Cette diminution de transparence dans l'atmosphère explique la chaleur accablante qui d'ordinaire précède la chute de la grêle, la chaleur rayonnante de la terre étant réfléchie vers le sol au lieu de gagner les régions supérieures de l'atmosphère qui, par conséquent, n'en sont que plus froides. Le sol, sous l'influence de ces circonstances, s'échauffe fortement ainsi que les couches d'air qui sont en contact avec lui; mais cette température décroît rapidement avec la hauteur, parce que les couches d'air ne se mélangent pas; et quand même une chaleur brûlante règne dans le bas, à 2,500 ou 3,000 mètres le thermomètre est au-dessous de 0. Il se produit alors un courant ascendant très-énergique, et quand même l'air ne serait pas très-humide, cependant les couches supérieures de l'atmosphère sont saturées rapidement; il se forme des nuages inférieurs aux *cirrus*, qu'il ne faut pas confondre avec eux, et qui sont des *cumulus*. On voit à la fois la couche supérieure des *cirrus* devenir plus dense et les *cumulus* s'accroître avec une rapidité extraordinaire; le vent, qui souffle dans des directions opposées, contribue beaucoup à ce double effet. Les nuages se dissipent quelquefois sans se résoudre en pluie ou en grêle; mais le plus souvent, au contraire, ils continuent à s'accroître par l'effet de courants d'air froid, qui en descendant déterminent des précipitations de vapeur aqueuse accompagnées d'un grand déga-

gement d'électricité. Nous voyons ainsi comment se forment deux couches de nuages superposées, mais distinctes, condition indispensable, suivant tous les physiciens, à la formation de la grêle. La couche la plus élevée, formée des *cirrus* accumulés par les vents, doit être toujours nécessairement chargée d'électricité positive, tandis que la couche inférieure, provenant essentiellement des vapeurs qui s'élèvent de la surface du sol, doit être en général négative [1]. Les particules glacées, soit les flocons de neige de la couche des *cirrus* fortement rapprochés les uns des autres sous l'impulsion des vents, soit supérieurs, soit inférieurs, qui les poussent en tous sens en formant des tourbillons, prennent la forme de grains de grésil. Ces grains poussés par leur poids et attirés vers les nuages inférieurs, soit les *cumulus*, y trouvent une prodigieuse quantité d'eau suspendue dans l'espace; ils la condensent à leur surface en traversant cette couche toujours très-épaisse, et si la température des régions supérieures est encore assez élevée, ils se fondent pendant leur chute et donnent naissance à ces larges gouttes de pluie qui précèdent souvent les orages et qui tombent par petites averses comme la grêle; ce n'est que de la grêle fondue. On voit, en effet, très-souvent tomber du grésil ou de la neige sur les hautes montagnes pendant qu'à leur pied il tombe de la pluie qui n'est évidemment que cette neige ou ce grésil fondu. Mais si les grains de grésil sont très-froids et un peu volumineux, si en même temps la température des nuages qu'ils traversent est assez basse (et elle l'est d'autant plus que ces nuages étant plus épais la température est plus élevée près du sol), alors l'eau qui se condense autour de leur surface, étant très-froide, se trouve à une température qui peut être facilement au-dessous de 0°. Remarquons, en effet, que l'eau est déjà dans les nuages à l'état liquide, qu'elle n'a donc point de chaleur de vaporisation à perdre comme si elle était à l'état de vapeur. Cette eau, quoique au-dessous

[1] Ce principe, établi par les observations de M. Peltier, est une conséquence, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, du mode de production de l'électricité atmosphérique.

de 0°, ne se gèle pas toujours immédiatement; car on sait que l'eau peut se refroidir jusqu'à 10 et même 20° au-dessous de 0° sans devenir solide; mais il suffit de la moindre action mécanique pour déterminer sa congélation; ainsi d'autres grains de grésil qui y pénètrent, l'électricité qui en rayonne, peuvent facilement, en produisant un ébranlement dans l'enveloppe d'eau qui entoure le grain de grésil, la solidifier brusquement. C'est probablement ce qui se passe dans les grêlons qu'on trouve formés tout d'une pièce et contenant des particules neigeuses outre le noyau central; dans le cas où il existe des parties concentriques, il est probable que l'eau s'est congelée à mesure qu'elle se condensait. L'électricité négative du nuage inférieur, en provoquant le rayonnement de la positive de l'eau très-froide condensée autour du noyau, est une des causes les plus actives de sa congélation, laquelle est accompagnée d'un bruissement particulier qu'on remarque dans les orages de grêle, et qui provient de l'émission de l'électricité. Nous avons une preuve de la faculté qu'a l'eau de rester à l'état liquide, même à une température très-inférieure à 0°, quand elle est suspendue dans l'atmosphère, dans le fait observé par M. Boisgiraud de larges gouttes de pluie qui, en tombant sur un sol dont la température était notablement au-dessus de 0°, se changeaient immédiatement en glace par l'effet de leur contact avec un corps solide. Les mêmes gouttes de pluie auraient dû former de la grêle si, par une circonstance exceptionnelle, elles ne s'étaient pas trouvées en dehors des conditions ordinaires qui déterminent cette formation [1].

M. Lecoq, qui s'est trouvé assister sur le Puy-de-Dôme à la formation d'un orage de grêle, en a décrit minutieusement les détails qui se trouvent parfaitement en accord avec la théorie que nous venons de donner. Ainsi il a constaté la présence de deux couches de nuages superposées et celle de deux vents opposés poussant les nuages les uns vers les autres; il a bien

[1] Il est probable que dans ce cas, l'eau condensée autour du grain central de grésil appartenait à un nuage négatif, et que se trouvant dans une atmosphère négative, elle n'avait pas rayonné son électricité.

remarqué que les grêlons ne vont point d'un nuage à l'autre; ils sont animés, au contraire, d'une vitesse horizontale très-grande, étant poussés par un vent très-froid ; ils ne se choquent nullement pendant leur transport horizontal, de sorte qu'on ne peut attribuer à leur choc le bruit qui précède leur chute; ils possèdent également un mouvement de rotation très-rapide; enfin on les voit se repousser fortement et offrir ce tourbillonnement qu'on aperçoit de la surface de la terre et qui chasse dans tous les sens les grêlons que le vent finit par réunir en leur imprimant sa propre direction. Toutes ces circonstances s'expliquent parfaitement en admettant que l'électricité que renfermait l'eau qui en se condensant forme le grêlon, en sort en partie en déterminant sa congélation et en lui imprimant un mouvement de rotation, tandis qu'une autre partie de l'électricité reste dans le grêlon, ce qui le rend électrique.

Pour se rendre compte des causes qui font que la chute de la grêle a lieu dans certaines localités plutôt que dans d'autres, il faudrait analyser toutes les circonstances variables d'un endroit à un autre, qui déterminent soit des courants d'air ascendants ou descendants, soit des vents ayant une direction particulière. Il se forme même dans quelques vallées, par l'effet du réchauffement des faces latérales des montagnes frappées par les rayons solaires, des appels d'air froid qui amènent souvent avec eux les nuages chargés d'un grésil qui, en traversant les épais nuages qui le séparent du sol, se convertit en grêle ou en grosse pluie si la température est trop peu basse. M. Blanchet affirme que les choses se passent ainsi dans la vallée du Léman, et il appuie son assertion sur l'observation qu'il a faite des courants d'air et des vents qui règnent un peu avant et pendant la chute de la grêle. Il est possible qu'indépendamment de la direction des vents, la nature du sol puisse influer sur la chute de la grêle comme sur la présence des orages; si en effet le sol se trouve, par une cause quelconque, chargé d'une électricité contraire à celle des nuages, il attirera ces nuages et par conséquent avec eux la pluie ou la grêle qu'ils renferment. Ce n'est donc que par des observations suivies et bien

faites dans les lieux qui sont le plus fréquemment frappés par la grêle, qu'on pourra être mieux fixé non sur l'origine même du météore, qui nous paraît maintenant assez claire, mais sur les causes qui déterminent et circonscrivent sa chute.

Le rôle que l'électricité joue dans l'apparition de la grêle avait fait croire qu'on pourrait se mettre à l'abri de ce fléau, comme on se met à l'abri de la foudre, en soutirant l'électricité des nuages orageux. De là l'invention des paragrêles; les essais qu'on en a faits dans différents pays, particulièrement dans ceux de vignoble, n'ont point réussi. Il est vrai que les moyens employés étaient très-imparfaits; mais le principe ne nous paraît pas suffisamment prouvé pour qu'avec des moyens plus parfaits on eût eu plus de succès. En effet, si l'électricité joue un rôle dans la production de la grêle, ce n'est qu'un rôle très-secondaire, et elle est bien plus un effet qui accompagne cette production qu'une cause qui la détermine. D'ailleurs, pour empêcher la formation de la grêle, s'il était vrai qu'elle est due à l'électricité, il faudrait atteindre le nuage même où cette formation a lieu pour en soutirer l'électricité, et les paratonnerres les plus élevés n'y parviendraient pas. Aussi M. Arago avait-il proposé, pour résoudre la question, de faire monter dans des nuages orageux, et beaucoup plus haut que Romas fit monter son cerf-volant, des ballons captifs munis d'une pointe métallique faisant fonction de conducteur. En soutirant ainsi leur électricité à ces nuages orageux, M. Arago est disposé à croire qu'on les convertirait en nuages inoffensifs et qu'on ferait ainsi avorter les plus forts orages. La question est de savoir en effet quelle influence l'électricité exerce sur la rencontre des nuages opposés dont le mélange est nécessaire pour la production de la grêle. Cette rencontre n'est-elle que le résultat de l'action de deux vents opposés, comme le croit M. Olmsted, ou l'électricité y a-t-elle une part? Enfin la rencontre des nuages ayant eu lieu, l'électricité contribue-t-elle à la conversion des grains de grésil en grêlons? Peut-on croire que si on faisait disparaître l'électricité on n'aurait que du grésil et plus de grêlons? Il y aurait une grande importance à résoudre définitivement ces questions, non-seulement sous le rapport scientifique, mais

dans l'intérêt de l'humanité, et en particulier de l'agriculture.

Les *trombes* sont encore un de ces phénomènes naturels, comme la grêle, dans lesquels l'électricité semble jouer un rôle assez important et dont la nature cependant n'est pas bien déterminée. Les trombes sont des amas de vapeurs vésiculaires, c'est-à-dire d'eau mêlée d'air comme les nuages, mais très-épais et très-denses, qui sont ordinairement animés d'un mouvement rapide de rotation et de translation, ayant la plupart du temps la forme d'un cône dont la base est dirigée le plus souvent vers les nuages et le sommet vers la terre, quelquefois aussi dans le sens inverse. Ces météores déracinent les arbres, les dépouillent de leurs feuilles, les foudroient, les enlèvent et les transportent à de grandes distances; ils renversent les maisons, enlèvent leurs toitures, détruisent ou brisent tout ce qui se trouve sur leur passage; souvent ils déversent de la pluie et de la grêle, ils sont aussi très-souvent accompagnés de globes de feu, lancent des éclairs, font entendre le bruit du tonnerre et se dissipent assez ordinairement après. Les trombes s'observent aussi bien sur mer que sur terre.

M. Kaemtz considère les trombes comme uniquement dues à des courants d'air ; ce sont des tourbillons de vent qui seulement ont lieu sur une plus grande échelle que ceux qui se manifestent souvent à l'approche des orages, et qu'on voit enlever à plusieurs mètres de hauteur les corps légers, tels que la poussière, les feuilles d'arbre, de la paille. Dans les trombes proprement dites, le tourbillon existe non-seulement dans les nuages, mais encore dans l'eau qui s'élève et va rejoindre le nuage qui s'abaisse vers elle; en effet dans les trombes qui ont lieu sur des lacs ou sur la mer, on voit l'eau du lac ou de la mer monter à la rencontre du nuage et former avec lui deux cônes se touchant par leur sommet, et animés d'un mouvement giratoire très-rapide. Comme nous l'avons dit, les trombes ont lieu sur mer aussi bien que sur terre; au milieu de la mer équatoriale, on ne les trouve que là où les vents alizés ne soufflent pas d'une manière régulière; elles se montrent surtout dans la région des calmes; elles se forment le plus souvent au

moment du changement des moussons, et dans les latitudes plus élevées elles coïncident avec les orages.

Il résulte des observations de M. Kaemtz, et de celles de plusieurs autres météorologistes, que les trombes ont lieu presque toujours quand deux vents opposés passent l'un à côté de l'autre, ou bien quand un vent très-vif règne dans le haut de l'atmosphère tandis que le bas est calme. A mesure que le tourbillon qui se forme par la rencontre des courants d'air augmente, il descend, et s'il atteint la surface de l'eau, celle-ci s'agite et s'élève, en même temps le nuage s'abaisse et tous deux finissent par se réunir. Mais en général la trombe est formée en grande partie de vapeurs condensées, et ce qui le prouve, c'est que lorsqu'elle a lieu sur la mer, l'eau qui s'en échappe n'est jamais salée. Lorsque l'air est très-sec, les tourbillons ne déterminent pas toujours la condensation des vapeurs, et la violence du vent n'en est que plus remarquable.

Ainsi dans cette théorie, le vent et les courants d'air seraient la cause réelle de la formation des trombes, et les accidents électriques qui les accompagnent fréquemment seraient la conséquence naturelle de la présence de l'électricité accumulée dans les vapeurs condensées.

Suivant d'autres physiciens, l'électricité serait au contraire la cause immédiate des trombes. Peltier, dans un long et intéressant travail, a cherché à établir une théorie électrique des trombes, soit en reproduisant sur une petite échelle au moyen de l'électricité artificielle des effets analogues à ceux des trombes, soit en discutant les phénomènes que présentent les trombes elles-mêmes dont il décrit 137, sur lesquelles il est parvenu à avoir des relations détaillées.

Il est conduit à admettre que lorsque la tension des nuages est très-grande, l'attraction puissante qui en résulte abaisse ces nuages vers la terre, et les met en communication avec elle par la portion de nue la plus avancée. Cette portion prolongée jusqu'au sol sert alors de conducteur, et offre une voie à l'écoulement de l'électricité des nuages ; c'est cette portion descendante qui constitue la *trombe*. Tous les corps placés à la surface de la terre sous le nuage d'où sort la trombe servent

de conducteurs en raison de leur propre conductibilité, de leur forme, de leur étendue et de leur proximité du sol. Les corps chargés de l'électricité contraire sont attirés et soulevés vers la trombe, si leur poids ne s'y oppose pas, puis leur électricité s'étant neutralisée en partie, la pesanteur l'emporte, ils retombent sur la terre où ils reprennent leur première tension électrique; ils remontent de nouveau vers la nue, formant ainsi au-dessous du cône un amas nuageux. Si les corps sont attachés à la terre, comme les arbres par exemple, ils se chargent instantanément d'une immense quantité d'électricité, ils sont arrachés et transportés au loin par l'attraction du nuage. Ce qui semble confirmer cette explication, c'est que quand on observe les arbres ainsi arrachés, on les trouve presque tous fendus en latte d'une très-petite section sur une longueur de plusieurs mètres; et les parties du bois, ainsi divisées, paraissent entièrement dépouillées de séve; effet analogue à celui que produit, comme nous l'avons vu, le passage de la foudre dans les arbres. Il y a plus, tous les arbres qui sont sur le passage de la trombe ne sont pas également renversés; il se fait pour ainsi dire un choix entre eux; effet difficile à expliquer, si c'est la force du vent qui est la cause de l'arrachement, mais qui se comprend mieux si c'est un résultat de l'attraction électrique, la différence dans la nature, dans l'humidité intérieure de l'arbre ainsi que dans l'état du sol sur lequel il repose devant en entraîner une dans sa susceptibilité à être électrisé. M. Peltier remarque avec raison que la chute des arbres tient à un effet dynamique, puisqu'il est une conséquence de la vaporisation de la séve produite par la chaleur qui accompagne la décharge; ces effets dynamiques qui ont lieu dans les trombes, aussi bien que les statiques, se manifestent quand les nuages sont abaissés pour former un bon conducteur, et que ce conducteur se met en communication, par exemple, avec les arbres. Mais en général la trombe ne constitue qu'un conducteur imparfait entre les nuages orageux et la terre, et le bruit qui accompagne le météore serait le résultat d'une multitude de petites décharges partielles, dont l'intensité varierait avec la résistance du milieu dans lequel elles s'opèrent. Quant aux bourrasques de

vent qui viennent ajouter leur puissance matérielle à celle de l'électricité, elles sont un produit immédiat, suivant M. Peltier, des attractions et des répulsions électriques. En effet, lorsque par une brusque attraction, des masses d'air sont entraînées rapidement de la circonférence au centre, leur marche se résout très-souvent en un mouvement giratoire qui rend leur force plus dévastatrice. Mais, quelle que soit leur énergie, leur action est limitée dans une circonscription assez restreinte, ce qui indique suffisamment que cette puissance perturbatrice est toute locale, et qu'elle ne reçoit ni ne pousse au loin les vents violents qui l'accompagnent.

M. Peltier a réussi à reproduire tous les effets des trombes, en supposant que le nuage soit représenté par un globe constamment électrisé et couvert de pointes, et mettant dans sa sphère d'activité des vapeurs, des poussières et de l'eau; avec l'eau la dépression du liquide a lieu; avec les poussières on a des courants directs du centre à la circonférence, se transformant en mouvements giratoires. Tous ces effets disparaissent en remplaçant le globe garni de pointes par un globe poli; au lieu de la dépression du liquide, on obtient une protubérance; l'attraction devenant plus considérable, l'eau s'élève en masse, et il y a accélération de la vaporisation; avec des corps légers placés entre un plateau de cuivre communiquant avec le sol et une sphère supérieure électrisée, on produit les effets des trombes.

Sans contester que l'électricité ne joue un rôle dans le phénomène des trombes, nous ne croyons pas que la théorie de M. Peltier soit à l'abri de toute objection; nous reconnaissons avec lui que celle qui ne voit que dans l'action des vents la cause de ces phénomènes, est insuffisante, puisque sur 137 trombes signalées par lui, il y en a eu 33 qui ont existé sous un calme plus ou moins complet; d'un autre côté, il y en a eu 10 qui ont eu lieu sous un ciel sans nuages. Puis si on peut expliquer par l'attraction électrique d'un nuage des trombes de poussière et de corps légers, il est bien difficile de croire que cette attraction soit capable de déraciner des arbres, de soulever des maisons; ne serait-il pas plus naturel d'admettre que c'est le nuage qui doit venir vers les corps aussi solidement

fixés au sol que le sont des arbres et des maisons, que de supposer que ce sont ces corps qui vont vers le nuage? L'eau elle-même pourrait-elle être soulevée aussi haut à la rencontre du nuage qu'elle l'est dans quelques cas? Nul doute, comme nous l'avons déjà dit, qu'il y ait des phénomènes électriques très-prononcés dans les trombes; nous sommes même disposés à admettre que cette électricité est plus qu'un effet; mais nous ne croyons pas qu'on ait encore bien réussi à établir le rôle positif qu'elle y joue. Remarquons encore que rien n'explique pourquoi cette influence électrique d'un nuage sur la terre qui ordinairement se manifeste par la chute de la foudre et les phénomènes concomitants, se trouve se traduire dans quelques cas par une trombe; il y a là quelque condition particulière nécessaire pour que l'action revête cette forme qui échappe à l'observateur. Cette condition ne serait-elle point un état particulier qu'aurait le globe, dans les portions situées un peu au-dessous de la surface du sol sur laquelle se promène la trombe? Certains phénomènes souterrains qui précèdent ou accompagnent fréquemment les orages, et dont nous parlerons dans le paragraphe suivant, sembleraient donner quelque consistance à cette opinion; la trombe serait ainsi un phénomène à la fois terrestre et atmosphérique.

C'est encore à l'attraction électrique exercée par les nuages, que M. Peltier attribue les phénomènes connus sous le nom de *raz de marée* et de *seiche*. Le raz de marée consiste dans une élévation subite et quelquefois assez considérable du niveau de la mer, tout à fait indépendante des marées proprement dites, qu'on ne peut observer que près des côtes. Ainsi le 17 juillet 1841, on vit à Cette le niveau de la mer s'élever en quelques minutes à $1^{m},22$ au-dessus de son niveau ordinaire; on en cite encore d'autres exemples dans les différentes mers. Suivant M. Peltier, ce phénomène est dû à la puissance attractive d'un nuage électrique qui, agissant sur une surface d'eau, quelquefois se borne à soulever de la vapeur vésiculaire sous forme de colonnes, puis, lorsqu'elle est plus forte, soulève l'eau elle-même aussi sous forme de colonnes bouillonnantes, et même dans quelques cas soulève toute la surface de l'eau dans une grande

étendue, dans le cas plus rare où cette puissance attractive est à peu près égale sur toute l'étendue du nuage. Les seiches sont un phénomène du même genre qui s'observe sur les lacs et spécialement sur le lac de Genève. Elles consistent dans des changements de niveau qui se manifestent soudainement sans que rien puisse les faire prévoir, et qui ont lieu seulement aux extrémités rétrécies du lac. Ces changements qui sont quelquefois considérables, car on les a vus s'élever jusqu'à près de deux mètres, ne durent qu'un instant, mais ils sont accompagnés d'oscillations assez prolongées dans le niveau. On ne peut les attribuer ni à des coups de vent, ni à des variations dans la pression atmosphérique, car elles ne sont généralement accompagnées ni d'un vent plus fort qu'à l'ordinaire, ni de mouvements dans le baromètre. C'est donc, comme Bertrand l'avait le premier imaginé, par des nuées électriques qui attirent et soulèvent les eaux, qu'on peut les expliquer; ces eaux retombant ensuite produisent des ondulations dont l'effet est comme celui des marées, d'autant plus sensible que les bords sont plus resserrés. Un fait favorable à cette explication, est que le temps que l'eau met à monter au-dessus de son niveau est d'autant moindre qu'elle s'élève plus haut, et qu'au contraire elle met d'autant plus de temps à s'abaisser qu'elle s'est élevée plus haut.

Ainsi, d'après Peltier, les trombes, les raz de marée et les seiches ne seraient que les modifications d'un même phénomène; c'est à la même cause qu'on peut attribuer la disparition entière de l'eau des mares peu profondes qui, soulevées avec ce qu'elles renferment, donnent naissance à ces chutes de substances solides même quelquefois vivantes, telles que grenouilles et poissons, qui sont signalées de temps à autre.

Ainsi que nous venons de le voir, le rôle que l'électricité joue dans la plupart des phénomènes météorologiques est très-important, lors même qu'il n'est pas encore bien défini. Il est probable que ce rôle est plus général même que nous ne pouvons le conclure des observations que nous avons rapportées; ce qui semblerait le faire présumer, c'est le rapport qui existe entre les variations du baromètre et celles de l'état électrique de l'air; or les variations du baromètre sont liées avec toutes

les variations météorologiques de l'atmosphère, car on les a attribuées soit à l'influence des vents, soit aux modifications de la température, soit aux changements survenus dans la quantité de vapeurs répandues dans l'air. Quelle qu'en soit la cause, il n'en résulte pas moins d'observations très-suivies faites par M. Quetelet que le baromètre se tient d'autant plus haut que l'air est plus électrisé positivement; la différence qui est surtout sensible pendant les mois froids, diminue en été; et elle change de signe pendant le mois le plus chaud. Quand l'électricité de l'air est négative, le baromètre, toutes choses égales, atteint son état le plus bas [1]. Du reste, ce cas est très-rare, car il ne s'est présenté que 23 fois sur les nombreuses observations de plusieurs années au moyen desquelles M. Quetelet a dressé le tableau suivant en s'y prenant comme suit. Il a formé pour chaque mois deux groupes de ses observations électriques, l'un contenant les observations qui surpassaient l'indication moyenne du mois, l'autre contenant les observations qui tombaient au contraire au-dessous de cette moyenne; puis il a pris ensuite les hauteurs barométriques qui correspondaient à chacune de ses observations électriques et qui se sont trouvées partagées naturellement de cette manière en deux groupes. Il avait ainsi pour chaque mois, une moyenne barométrique correspondant aux jours où l'électricité s'était manifestée avec le plus d'intensité, et une seconde moyenne pour les jours où l'on avait constaté le moins d'électricité. M. Quetelet n'a pas fait entrer dans ce calcul les 23 observations pour lesquelles

[1] M. Peltier, dans un grand travail sur la cause des variations barométriques, les attribue exclusivement à l'état électrique des vapeurs. Partant du principe que ces vapeurs sont composées de vésicules qui, ayant chacune leur électricité propre, se repoussent mutuellement, il montre que quand elles sont positives leur densité augmente, parce que le globe négatif en les attirant les rapproche les unes des autres, tandis que lorsqu'elles sont négatives la répulsion exercée sur elles par le globe les éloigne et diminue par conséquent leur densité, c'est-à-dire la quantité qui s'en trouve dans le même volume d'air. Dans le premier cas la pression doit augmenter, dans le second diminuer conformément à l'observation. M. Peltier cherche à rendre compte par sa théorie des différences que présentent avec les latitudes, les climats et les saisons, les variations soit régulières, soit irrégulières, du baromètre.

l'électricité était négative; ces observations ont été considérées à part; la moyenne de ces 23 observations a donné pour la hauteur barométrique 751^{mm},19, valeur qui diffère considérablement de 755^{mm},97 qui est la moyenne déduite des dix-sept dernières années. Voici maintenant le tableau dressé d'après les observations pour lesquelles l'électricité était positive, et dont M. Quetelet a déduit les conséquences que nous venons de rappeler.

MOIS	ÉTAT BAROMÉTRIQUE quand l'électricité était au-dessus de la moyenne	ÉTAT BAROMÉTRIQUE quand l'électricité était au-dessous de la moyenne	Différence des nombres précédents.	DEGRÉS D'ÉLECTRICITÉ par un ciel serein.	DEGRÉS D'ÉLECTRICITÉ par un ciel couvert.	Rapports de ces nombres.	INTENSITÉ RELATIVE du vent. Max. diurne	INTENSITÉ RELATIVE du vent. Min. diurne.	Rapports des deux nombres précédents.
	mm	mm	mm						
Janvier.	758,56	754,84	3,72	1133°	268°	4,23	339	206	1,27
Février.	57,02	55,61	1,41	493	220	2,24	288	180	1,60
Mars.	57,85	52,08	5,77	261	129	2,01	422	231	1,83
Avril.	52,52	51,17	1,35	149	71	2,09	314	126	2,50
Mai.	56,07	55,54	0,55	63	46	1,39	360	148	2,43
Juin.	56,40	55,74	0,66	37	36	1,03	323	113	2,88
Juillet.	57,00	57,26	0,26	35	41	0,85	328	141	2,32
Août.	55,25	54,43	0,82	64	56	1,14	338	149	2,27
Septembre.	57,36	56,52	0,84	78	42	1,86	282	98	2,88
Octobre.	56,44	52,09	4,35	168	75	2,24	400	229	1,74
Novembre.	57,10	54,96	2,14	226	109	2,04	379	270	1,40
Décembre.	57,06	55,56	1,50	571	181	3,15	327	226	1,44
Année.	756,55	754,65	1,90	273	106	2,56	4051	2258	1,79

§ 6. Origine de l'électricité atmosphérique.

Volta et de Saussure avaient cru pouvoir attribuer l'électricité atmosphérique à l'évaporation qui a lieu sur la surface de la terre. De Saussure en particulier avait montré par un grand nombre d'expériences que toutes les fois qu'on projette de l'eau pure ou plus ou moins salée, acide ou alcaline, sur un creuset de métal chauffé au rouge, l'évaporation qui a lieu est accompagnée d'un fort dégagement d'électricité. Mais nous avons fait voir que ce dégagement n'est pas dû à l'évaporation,

mais bien à une action chimique. M. Pouillet a montré que si le creuset est de platine et le liquide projeté de l'eau distillée, il n'y a pas d'électricité produite[1]. Il n'en est plus de même, suivant lui, si l'eau est salée; dans ce cas, il y a une désagrégation chimique, même avec le creuset de platine, et il y a dégagement d'électricité. Or, comme l'immense proportion de l'eau qui s'évapore à la surface de la terre, est l'eau des mers qui est salée, M. Pouillet est disposé à voir dans cette évaporation de l'eau de mer la source de l'électricité atmosphérique. Il y ajoute comme seconde source la végétation qui a lieu sur la partie solide de la surface du globe, laquelle, suivant lui, fournit à l'air de l'électricité positive, tandis qu'elle donne au sol de la négative. Mais nous avons vu que le dégagement de l'électricité dans l'acte de la végétation est plus ou moins contestable et en tout cas bien faible et bien insuffisant pour rendre compte de la charge électrique considérable de l'atmosphère. Quant à l'évaporation de l'eau de mer il paraîtrait, d'après quelques expériences de M. Riess, que c'est au frottement des gouttelettes d'eau entraînées avec la vapeur, contre les parois du vase de platine où s'opère l'évaporation, plutôt qu'à l'évaporation elle-même que serait dû le dégagement d'électricité, qui ainsi ne résulterait pas de la ségrégation chimique.

Il semble donc nécessaire de recourir à des causes plus générales pour trouver l'origine de l'électricité atmosphérique. On avait eu l'idée de la chercher dans l'action calorifique du soleil sur l'atmosphère et dans la distribution de la température qui en est la conséquence ; mais jusqu'ici l'expérience n'a jamais pu démontrer dans les gaz et les vapeurs la moindre trace de thermo-électricité. Ce résultat négatif est une conséquence nécessaire de la théorie des phénomènes thermo-électriques telle qu'elle ressort des travaux de Magnus; d'ailleurs les liquides eux-mêmes n'étant pas susceptibles de devenir électriques par la chaleur, les vapeurs et les gaz doivent l'être encore moins.

C'est encore dans l'action des rayons solaires que M. Schoen-

[1] Tome II, page 597.

bein veut trouver la cause de l'électricité atmosphérique; mais c'est dans leur action chimique et non dans leur action calorifique. Après avoir prouvé que sous l'influence de la lumière, l'oxygène est susceptible d'exercer une action chimique, comme s'il était ozoné, M. Schoenbein estime que l'oxygène de l'air, sous l'influence des rayons solaires, devient capable d'agir électro-chimiquement sur les molécules d'eau. Il en résulte une polarisation électrique des filets de particules d'eau qui composent les nuages, et par conséquent une tension électrique. Mais cette théorie aurait besoin pour être justifiée de s'appuyer sur des expériences directes et positives, et d'ailleurs elle ne rendrait compte que des manifestations électriques des nuages orageux et non de celles de l'air atmosphérique à l'état normal.

M. Becquerel le père, à la suite de recherches sur le dégagement de l'électricité qui a lieu au contact du sol et d'une nappe ou d'un cours d'eau, dégagement qu'il est parvenu à rendre très-sensible[1], s'est demandé si l'on ne pourrait pas trouver dans cette production d'électricité l'origine de celle qui charge l'atmosphère. Quand l'eau s'évapore soit d'un cours d'eau, soit de la terre, elle doit nécessairement emporter avec elle un excès d'électricité de nature semblable à celle que possède la surface d'où elle s'évapore, lequel se répand dans l'atmosphère. Cette électricité peut provenir non-seulement de la réaction de l'eau de la rivière sur celle qui surmonte le sol, mais encore de la décomposition des matières organiques; dans ce dernier cas la vapeur est toujours positive, qu'elle

[1] Les appareils employés aux recherches de M. Becquerel se composent : 1° de diaphragmes en porcelaine poreuse ou de petits sacs en toile à voile, contenant chacun une lame d'or ou de platine dépolarisée, entourée de charbon, de sucre candi, afin de rendre les effets électriques constants pendant quelques instants pour les mesurer; 2° des boussoles des sinus, d'une assez grande sensibilité, appropriées à ce genre d'expérience; 3° d'électromètres atmosphériques destinés à recueillir l'électricité des vapeurs se formant au-dessus de l'eau ou du sol; 4° de divers accessoires, tels que bobines de résistance, fils conducteurs recouverts de gutta-percha, etc. Comme on le conçoit facilement, ce sont les vases poreux qu'on place dans l'eau et dans le sol.

provienne de la rivière ou du sol où s'opère la décomposition; dans le premier les deux vapeurs sont de signe contraire; les effets sont alors complexes.

Il y a dans la théorie de M. Becquerel un point qui nous paraît parfaitement plausible, c'est que la vapeur d'eau est le véhicule qui porte dans l'atmosphère l'électricité dont est chargé le liquide d'où elle émane. Mais la cause à laquelle il attribue la production même de l'électricité ne nous paraît ni assez générale, ni assez constante soit dans l'intensité, soit dans la nature de ses manifestations, pour pouvoir être considérée comme la véritable et unique source de l'électricité atmosphérique.

Nous estimons donc qu'il faut chercher cette source dans quelque action naturelle d'un ordre supérieur à celles que nous avons indiquées. Nous ne pouvons trouver une action de ce genre que dans l'influence du soleil sur la terre ou dans la terre elle-même. Nous avons exclu l'action chimique du soleil; quant à son action directe, elle pourrait peut-être donner naissance à des courants fermés constituant le magnétisme, mais nous ne voyons pas comment elle pourrait développer sur notre globe de l'électricité statique, et en particulier charger en même temps la terre elle-même d'électricité négative et son atmosphère d'électricité positive. C'est donc dans quelque grand phénomène naturel s'opérant à la surface ou près de la surface du globe terrestre, qu'il nous semble que doit se trouver l'origine de l'électricité atmosphérique, et ce phénomène nous paraît être l'action chimique continue qui a lieu sur la surface intérieure de l'écorce solide du globe là où est la limite entre la portion déjà solidifiée et celle qui est encore à l'état de liquidité incandescente. Cette action chimique provient évidemment non-seulement d'actions locales [1], mais aussi des infiltrations de l'eau de la mer, et il doit en résulter, d'après les lois connues

[1] L'électricité engendrée par ces actions locales ne serait-elle point liée avec les tremblements de terre? c'est ce que sembleraient faire présumer les bruits souterrains assez semblables aux roulements du tonnerre, qui précèdent ordinairement et souvent accompagnent les forts tremblements de terre.

du dégagement de l'électricité dans les actions chimiques, que cette eau se charge d'électricité positive, tandis que la partie solide de la terre se charge d'électricité négative. Les vapeurs qui s'élèvent de la mer emporteraient donc constamment avec elles dans l'atmosphère de l'électricité positive, tandis que le globe garderait, là où il n'y a pas de mer, l'électricité négative. Mais c'est surtout dans les régions tropicales où l'évaporation est beaucoup plus active, que l'atmosphère recevrait de la mer ces vapeurs positives, lesquelles, après s'être élevées plus ou moins verticalement, seraient chassées dans les deux hémisphères par le courant tropical des hautes régions de l'atmosphère. Cheminant d'abord horizontalement, ce courant d'air chargé des vapeurs positives se rapprocherait toujours plus de la surface du sol à mesure qu'il se refroidirait davantage en s'éloignant des régions équatoriales; et aux pôles mêmes de la terre ou dans leur voisinage il viendrait presque en contact avec le sol négatif, produisant ainsi, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, le phénomène des aurores polaires. On conçoit également dans cette théorie que l'atmosphère doive renfermer beaucoup plus de vapeurs positives dans l'hémisphère où se trouve le soleil que dans l'hémisphère où il n'est plus, puisque l'évaporation y est beaucoup plus forte; que dès lors c'est entre l'équinoxe du printemps et celui de l'automne que doivent avoir lieu le plus grand nombre d'orages dans l'hémisphère boréal, tandis que ce doit être l'inverse dans l'austral; quant aux régions équatoriales, il doit y en avoir toute l'année également. Par contre les vapeurs doivent être beaucoup plus surbaissées dans l'hémisphère boréal que dans l'austral, entre l'équinoxe d'automne et celui du printemps, et réciproquement pour l'hémisphère austral; donnant naissance ainsi non plus à des orages, du moins très-rarement, mais essentiellement à des brouillards toujours positifs qui recouvrent en grande partie alors la surface de la terre. A côté de ces vapeurs positives qui s'élèvent constamment de la mer et qui donnent à l'atmosphère son électricité positive, il part de la terre solide elle-même ou plutôt de l'eau qu'elle renferme çà et là et qui est en contact avec elle, des vapeurs

négatives qui surtout en été où l'évaporation est plus active, neutralisent en partie en s'élevant dans l'atmosphère son électricité positive, du moins dans la région la plus rapprochée de la terre. Ce sont de ces vapeurs négatives qui s'élèvent du sol que proviennent les nuages négatifs inférieurs dont la présence contribue essentiellement aux orages d'été et en particulier à la production de la grêle, lorsque très-épais et très-denses, ils attirent les nuages positifs des hautes régions de l'atmosphère remplis des particules glacées qui deviennent les noyaux des grêlons ou ceux des grosses gouttes de pluie, si la température n'est pas assez basse. Il est vrai que, pour que ces phénomènes se manifestent dans toute leur intensité, il faut que les vents locaux qui sont dus surtout à l'action calorifique des rayons solaires sur un sol découpé de mille manières, accumulent les nuages inférieurs dans une même portion de l'atmosphère, ce qui détermine également par l'attraction qu'ils exercent sur les nuages supérieurs positifs, l'accumulation de ces derniers dans les mêmes régions.

L'absence de ces nuages négatifs qui s'élèvent du sol, dans les régions de l'atmosphère situées au-dessus de la pleine mer, à de grandes distances des côtes, explique la rareté des orages dans ces parages, que nous avons constatée dans le § 3.

Ajoutons encore que la différence de nature dans l'électricité des vapeurs qui s'élèvent de la mer et de celles moins abondantes qui s'échappent du sol, rend compte d'une manière très-satisfaisante non-seulement, comme nous l'avons vu, des orages, mais des divers états électriques de l'atmosphère dans ses différentes régions et des variations que cet état éprouve. Ainsi on trouve rarement de l'électricité négative dans l'air pendant les mois froids où l'évaporation provenant du sol est nulle ou très-faible. Ainsi encore on comprend pourquoi l'humidité de l'air, dans la portion de l'atmosphère la plus rapprochée de la terre, augmente l'intensité de son état électrique en hiver et la diminue en été; c'est qu'en hiver cette humidité provient essentiellement des vapeurs dont l'air lui-même est chargé et qui sont positives, tandis qu'en été elle provient des vapeurs qui s'élèvent du sol et qui, étant négatives, neutralisent une certaine proportion de

l'électricité naturellement positive de l'atmosphère. Les époques des *maxima* et des *minima* diurnes mensuels d'électricité sont également une conséquence de la quantité plus ou moins grande de vapeurs dont l'air est imprégné, et de la proportion de ces vapeurs fournie par l'air et par le sol, c'est-à-dire par refroidissement et par évaporation.

Il nous reste maintenant à donner des preuves à l'appui de notre hypothèse sur l'origine même de l'électricité. Nous les trouvons d'abord dans le fait que l'eau de mer est positive, tandis que la surface du sol est négative; ce point établi par de nombreuses observations et en particulier par celles de M. Peltier en ce qui concerne la terre, celles toutes récentes de M. Becquerel en ce qui concerne la mer, explique pourquoi l'air est déjà positif dans celle de ses couches qui est en contact avec la surface de la mer, tandis que ce n'est qu'à une certaine distance du sol qu'il commence à le devenir dans les plaines éloignées des mers. Il rend compte également de l'attraction exercée par les montagnes nécessairement négatives sur les nuages traînants, ainsi que du phénomène désigné sous le nom de fumage des montagnes. Mais rien ne montre mieux la différence qui existe entre l'état électrique du globe terrestre et celui que possède son atmosphère, grâce aux vapeurs positives qu'elle renferme, que les phénomènes souterrains remarquables qui ont lieu quelquefois à l'approche des orages. Nous empruntons à M. Arago, qui en cite un grand nombre, la description de quelques-uns de ces phénomènes. Dans les collines du Vicentin, il existe une fontaine qui, même après une longue sécheresse, même aux époques où elle est complétement à sec, déborde subitement quand un orage se prépare, et remplit un canal large d'une eau très-trouble, qui se répand dans les vallées voisines. On avait foré à quelque distance de Perpignan un puits artésien qui fournissait à l'origine une grande quantité d'eau jaillissante; cette eau diminua rapidement, ce que tous les habitants attribuèrent à l'accumulation de matières vers la partie inférieure du trou; il arriva un jour où le ciel était couvert de nuages fortement orageux, qu'on entendit sous terre un bouillonnement sourd, suivi bientôt d'une explosion à la suite de laquelle la

fontaine artésienne fournit la même quantité d'eau qu'auparavant. En octobre 1755[1], une inondation subite produisit d'immenses ravages dans la plupart des vallées du Piémont; le désastre fut précédé d'horribles tonnerres, suivant Beccaria, à qui on doit cette relation; et d'après l'assentiment unanime, il eut pour cause principale l'immense volume d'eau souterraine qui tout à coup, pendant l'orage, sortit du sein des montagnes par de nouvelles ouvertures. On a remarqué que presque toutes les sources thermales éprouvent, à l'approche des orages, une agitation particulière qui se manifeste par un bouillonnement extraordinaire ou par d'autres symptômes, ce qui montre l'état électrique des lieux profonds d'où elles proviennent et auxquels elles l'ont probablement emprunté.

Il existe donc dans l'écorce solide de notre globe, toujours essentiellement négative, des portions qui de temps à autre le sont plus les unes que les autres; et il en résulte des phénomènes locaux tels que ceux que nous venons d'indiquer, tels encore que les trombes, et autres dans lesquels se manifeste évidemment l'influence locale du sol. Ces différences dans l'état négatif des différentes parties de la terre, soit à sa surface, soit à une certaine profondeur, sont une conséquence toute naturelle des différences de conductibilité et des variations dans l'action chimique intérieure, soit quant aux points mêmes où elle a lieu, soit quant à son intensité[2]. En ce qui concerne cette action chimique elle-même, nous avons une preuve de l'énorme quantité d'électricité qu'elle produit dans celle dont sont chargées les vapeurs et les cendres qui sortent des volcans. Nous avons déjà cité l'orage électrique si violent qui accompagna l'éruption du Vésuve de 1794; tout dernièrement une nouvelle éruption volcanique qui a eu lieu dans la mer

[1] C'était l'année du tremblement de terre de Lisbonne.

[2] On conçoit en effet que la présence d'eaux souterraines puisse déterminer une plus grande et une plus prompte accumulation d'électricité dans les parties du sol qui en sont voisines; on conçoit de même que des filons métalliques ou des roches conductrices qui pénètrent à de grandes profondeurs puissent amener aussi aux points auxquels ils correspondent une plus grande charge électrique; ce dont nous avons cité de nombreux exemples.

des Célèbes a également donné naissance à des effets électriques, éclairs, tonnerres, etc., tels que ceux qu'engendre un orage ordinaire. M. Palmieri a observé que les vapeurs qui s'élèvent du cratère du Vésuve sont toujours chargées d'une forte électricité positive; et le fameux brouillard sec de 1783, qui couvrit assez longtemps une bonne partie de l'Europe et dont l'électricité positive donna naissance à de fréquents orages, avait évidemment une origine volcanique, car son apparition suivit les violents tremblements de terre qui eurent lieu en Calabre au commencement de la même année, et il fut précédé dans les régions septentrionales de l'Europe par un vent du midi ou du sud-est. Un phénomène semblable avait déjà été observé en Perse en 1721, après le grand tremblement de terre qui détruisit la ville de Tauris la même année.

Quand on voit qu'il suffit d'une seule éruption volcanique pour charger l'air d'une quantité aussi considérable d'électricité positive, on conçoit facilement comment l'eau de mer qui est en communication avec les lieux souterrains où s'élaborent ces éruptions [1] est constamment électrisée positivement. Il existe très-probablement un nombre considérable de volcans sous-marins constamment en activité; les soulèvements de certaines côtes, l'apparition de temps à autre de quelques-uns de ces volcans à la surface de la mer en sont autant de preuves. L'eau de mer une fois positive, les vapeurs qui s'en élèvent le sont aussi, et voilà, comme nous l'avons déjà dit, l'explication de l'électricité positive dont notre atmosphère est chargée.

Nous voyons donc que la théorie que nous avons exposée rend compte d'une manière satisfaisante, jusque dans leurs plus petits détails, de tous les phénomènes de la météorologie électrique; il n'en est qu'un qui, il faut le reconnaître, échappe

[1] La présence si abondante des chlorures et des vapeurs hydrochloriques dans les produits des éruptions volcaniques, le nombre proportionnellement si grand de volcans rapprochés de la mer ou sous-marins, sont des preuves frappantes de l'action de l'eau de mer sur les matières incandescentes souterraines; toutefois un fait assez remarquable observé par M. Sainte-Claire Deville, c'est l'absence de vapeur d'eau, et par contre l'abondance de vapeurs de chlorure de sodium dans les émanations volcaniques.

Digitized by Google

complétement à notre intelligence, c'est celui des éclairs en boule. Voici cependant une explication de ce singulier météore que nous nous hasardons à présenter avec toute réserve. Ne se pourrait-il point que par l'effet de la propagation considérable d'électricité qui s'opère dans les nuages pendant un orage, l'eau fût décomposée comme elle l'est toutes les fois qu'il y a propagation d'électricité, et que de l'hydrogène mélangé avec une portion d'air atmosphérique renfermé dans une espèce d'enveloppe d'eau par une cause qui nous échappe, mais de même nature que celle qui détermine l'état de l'eau dans les nuages, déterminât la formation de ces boules qui sont comme des espèces de ballons qui flottent plus ou moins haut dans l'air? L'épouvantable bruit qui accompagne leur explosion serait dû à la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène qui aurait lieu au moment de la décharge des deux électricités contraires sur la route desquelles elles se trouveraient; la direction de la route même que suivent ces boules dépendrait, comme celle des coups de foudre, des nombreuses circonstances qui déterminent le chemin que parcourent les deux électricités dans leur tendance à se neutraliser. Quant à leur apparence lumineuse qui n'est pas accompagnée de chaleur sensible, elle proviendrait du rayonnement électrique de l'enveloppe aqueuse sortie du nuage avec une forte charge d'électricité; rayonnement qui se changerait en explosion au moment où le départ de cette électricité serait plus vivement sollicité par l'action de l'électricité contraire des corps ambiants.

Sans attacher plus d'importance qu'elle n'en mérite à l'explication que nous venons d'essayer et qui aurait besoin, pour prendre de la consistance, d'être appuyée sur des observations bien faites et sur des expériences directes, je ne puis m'empêcher cependant de remarquer qu'il ne serait pas impossible que la décomposition de l'eau et la présence de l'hydrogène qui en résulte, jouassent dans les phénomènes des orages électriques, un rôle plus grand qu'on ne le pense communément[1]. Qui sait

[1] C'est ici que pourraient trouver leur application, les considérations de M. Schoenbein sur l'influence de l'oxygène ozoné qui existe en grande quantité

en particulier si le bruit même qui accompagne l'explosion électrique et qui constitue l'élément du tonnerre, ne serait point dû à la recomposition de l'eau décomposée par la propagation de l'électricité dans le nuage? Cette décomposition et cette recomposition pourraient se suivre immédiatement sans laisser d'autres traces que le bruit provenant de la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène. Et ce n'est pas là une vaine hypothèse; car nous avons une preuve directe que les choses peuvent se passer ainsi dans le bruit effrayant qui accompagne le passage de l'étincelle électrique de l'appareil d'induction de Ruhmkorff, à travers de l'eau distillée qui en même temps est légèrement décomposée. Du reste, que ce bruit provienne de la décomposition et de la recomposition de l'eau, qu'il provienne simplement de la vibration imprimée directement à l'eau par le passage de la décharge, il n'en fournit pas moins une explication parfaitement plausible du bruit du tonnerre avec lequel il a la plus grande analogie, sauf qu'il a une intensité absolue naturellement bien moindre et qu'il n'est pas accompagné du roulement; différences qui sont une conséquence nécessaire des circonstances bien dissemblables dans lesquelles il est produit. Ajoutons en faveur de l'analogie que nous venons d'indiquer, que M. Dumoncel en faisant passer l'étincelle d'induction de Ruhmkorff à travers de minces couches d'eau divisées par flaques sur une surface vernie, a vu le trait de feu, par lequel l'étincelle se manifeste en traversant l'eau, se terminer par une boule rouge, semblable, sauf la grandeur, à celle qui constitue le tonnerre en boule.

dans l'air en temps d'orage; on conçoit facilement que cette influence pourrait contribuer d'une manière notable à la décomposition de l'eau.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre:

De Saussure. — Électromètre et électricité atmosphérique. — *Voyage dans les Alpes*, in-4. Neuchâtel, 1784. T. II, p. 164 et 172.

Peltier. — Électromètre atmosphérique. — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. IV, p. 385. — Météorologie électrique. — *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 173. — *Observations et recherches sur la formation des trombes*, 1 vol. in-8, Paris, 1840. — *Notice sur les travaux scientifiques de Pellier*, 1 vol. in-8, Paris, 1847.

Quetelet. — Électricité de l'air. — Rapports de l'humidité avec l'électricité. —

Mémoires de l'Académie de Bruxelles, 1849-1854. — *Arch. des sc. phys.* T. XI, p. 177, et T. XXVII, p. 5. T. II (1816), p. 93, et t. XLII (1829), p, 203.

Schübler.—Électricité atmosphérique.—*Bibl. univ.* T. II, p. 93; et t. XLII, p. 203.

Birt. — Observations d'électricité atmosphérique à Kew.—*Arch. des sc. phys.* T. XII, p. 224.

Plantamour. — *Idem*. — *Arch. d'électricité*. T. I, p. 260.

Romershausen. — Appareil pour l'électricité atmosphérique. — *Arch. des sc. phys.* T. X, p. 179.

Palmieri. — Électricité atmosphérique. — *Arch. des sc. phys.* T. XXVI, p. 105.

Arago. — Orages, tonnerre, éclairs, etc. — *Notices scientifiques*. T. I (Œuvres complètes).

Volta. — Retour périodique des orages. — *Ann. de ch. et de phys.* T. IV, p. 245.

Gay-Lussac. — Formation des nuages orageux. — *Ann. de ch. et de phys.* T. VIII, p. 158. — Instruction sur les paratonnerres. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXVI, p. 258. — Formation des tubes fulminaires. — *Idem*. T. XXXVII, p. 319.

Baer. — Fréquence des orages dans les régions polaires. — *Bibl. univ.* T. XXX (1840), p. 407.

Pouillet. — Instruction de l'Académie des Sciences sur les paratonnerres. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*. T. XXXIX (1854), p. 1142.

Blanchet. — Mémoire sur un orage et sur la grêle. — *Annuaire météorologique de France* (1852).

Despine. — Grêles tombées en 1840 en Piémont et en Savoie. — *Académie des sciences de Turin*. T. VII (*Deuxième série*).

Lecoq. — Formation de la grêle. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXI, p. 202, et *Bibl. univ.* T. IV (1836), p. 217.

Boisgiraud. — Formation de la grêle. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXII, p. 91.

Schoenbein. — Origine de l'électricité des nuages. — T. XV, p. 89.

Becquerel. — Origine de l'électricité atmosphérique. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*. T. XLII (1856), p. 661.

Kirwan. — Électricité positive du brouillard sec de 1783.—*Bibl. Brit.* T. XXII, p. 235.

Oersted. — Trombes. — *Bibl. univ.* (1840). T, XXIII, p. 145.

Walter. — Observations microscopiques sur la grêle. — *Arch. des sc. phys.* T. III, p. 30 [1].

[1] Les observations de M. Walter, que nous avons omis de citer, confirment en plusieurs points ce que nous avons dit sur la formation de la grêle. Ainsi il a trouvé que la grêle a une température de 3 à 4°, et qu'elle renferme une quantité d'air considérable qu'elle abandonne en fondant, preuve que c'est bien l'eau des nuages qui s'est congelée. Il a réussi en faisant geler de la vapeur d'eau sur une plaque de verre sous le microscope, à obtenir quand il opérait en hiver des cristaux réguliers et peu de globules, tandis qu'en été les cristaux étaient peu nombreux et confus, et les globules très-abondants. C'est exactement ce que présente la nature; double résultat qui s'explique par la peu d'abondance de la vapeur dans le premier cas et la lenteur de la condensation, tandis que dans le second les circonstances sont précisément inverses.

CHAPITRE III.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

§ 1. Description et théorie des instruments.

Nous avons déjà parlé dans le premier volume[1] de la propriété que possèdent les aimants d'affecter une direction déterminée sous l'influence du globe terrestre; nous avons même décrit quelques-uns des appareils au moyen desquels on parvient à déterminer cette direction, soit dans un plan vertical, soit dans un plan horizontal, c'est-à-dire la boussole d'inclinaison et celle de déclinaison. Maintenant nous sommes appelés à revenir sur la force elle-même qui produit cette direction, et qu'on a désignée sous le nom de *magnétisme terrestre;* elle est un des modes de manifestation des sources naturelles de l'électricité, puisque le magnétisme lui-même n'est qu'une forme particulière de l'électricité. Nous verrons en effet par l'étude que nous allons en faire que c'est bien du globe terrestre qu'émane la puissance qui agit sur les aimants placés à sa surface, et, après avoir cherché à analyser cette force dans ses différents éléments, nous essayerons d'en découvrir l'origine.

La force magnétique de notre globe se manifeste à sa surface par trois classes de phénomènes, savoir : la *déclinaison* de l'aiguille aimantée, son *inclinaison*, et l'*intensité* avec laquelle la force agit sur l'aiguille. Ainsi que nous l'avons déjà dit, la déclinaison est l'angle que forme avec la direction du méridien du lieu, la direction de l'aiguille aimantée placée sur un pivot vertical ou suspendue à l'aide d'un fil sans torsion de manière

[1] Tome I, page 151.

à ce qu'elle se tienne horizontale. L'inclinaison est l'angle que forme avec l'horizon dans le méridien magnétique la direction d'une aiguille aimantée soutenue par son centre de gravité, autour duquel elle peut tourner librement dans un plan vertical. Ces trois éléments, la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité, varient non-seulement d'un lieu à l'autre, mais dans un même lieu avec le temps; ils éprouvent même, dans l'intervalle des vingt-quatre heures qui constituent le jour, des variations fort petites il est vrai, mais cependant appréciables et soumises à une régularité remarquable; ils manifestent aussi quelquefois des variations irrégulières et accidentelles désignées sous le nom de perturbations, et dont l'existence est liée avec la présence de quelque phénomène naturel, tel en particulier que celui de l'aurore boréale.

On comprend combien il importe pour l'étude du magnétisme terrestre, qui est lui-même une partie si essentielle de la physique terrestre, qu'on ait des appareils susceptibles de donner avec la plus grande précision possible la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité, soit d'une manière absolue dans un instant et dans un lieu déterminés, soit dans les variations qu'elles éprouvent d'un lieu à un autre, ou d'un moment à un autre dans un même lieu. Parmi les nombreux appareils qui ont été imaginés dans ce but, nous nous bornerons à décrire: 1° ceux de Gambey, qui ont été longtemps employés à l'Observatoire de Paris et qui sont fondés sur les mêmes principes que les instruments usuels dont nous avons déjà parlé dans le premier volume, mais dans lesquels l'habile artiste français a introduit beaucoup de perfectionnements de détail; 2° les appareils de Gauss désignés sous le nom de *magnétomètres*, et dont l'emploi a largement contribué aux progrès qu'a faits depuis quelques années l'étude du magnétisme terrestre; 3° enfin les appareils enregistreurs, qui ne présentent rien de nouveau quant au fond, mais qui sont construits de manière que les observations s'enregistrent elles-mêmes.

La boussole de déclinaison de Gambey (fig. 355) présente un cercle horizontal gradué qui repose sur un trépied à vis calantes et se trouve lié à une lunette de repère, au moyen de

laquelle on peut s'assurer, en visant une mire avant et après l'observation, que le limbe est resté fixe. L'axe du cercle est percé et reçoit un axe intérieur qui porte une alidade munie

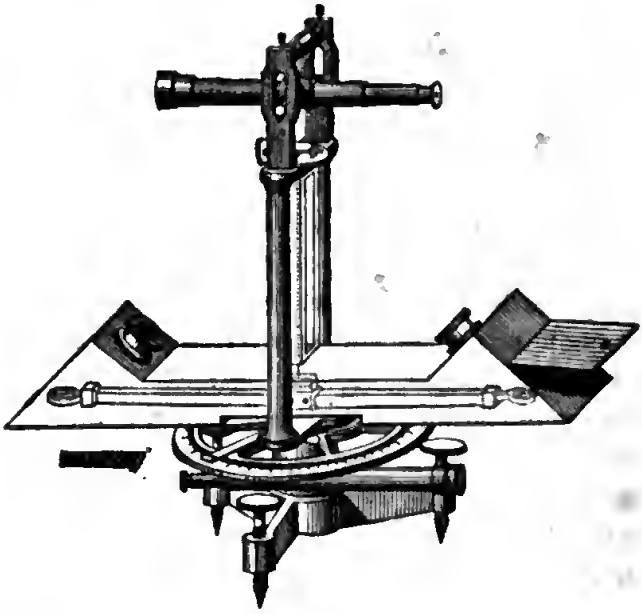


Fig. 355.

de verniers et une plaque sur laquelle est fixée toute la partie mobile de l'appareil; celle-ci se compose de deux colonnes verticales réunies par une traverse à moitié environ de leur hauteur et portant à leur extrémité supérieure un axe horizontal, auquel est fixée une lunette. Un barreau aimanté prismatique ayant environ 0m50 de long, muni à chacune de ses extrémités d'un anneau portant deux fils en croix, repose sur un étrier auquel est attaché un fil sans torsion enroulé par sa partie supérieure sur un petit treuil que supporte la traverse fixée aux colonnes. Une boîte qui met le barreau aimanté à l'abri des courants d'air est percée à chacune de ses extrémités de deux ouvertures, l'une permettant de viser la croisée des fils avec la lunette, l'autre destinée à éclairer ces mêmes fils. Enfin il n'est pas besoin d'ajouter que toutes les parties de l'appareil sont en cuivre rouge et qu'il ne doit pas s'y trouver la moindre parcelle de fer. Au moyen de cet instrument, on détermine l'angle

que fait le plan vertical passant par l'axe magnétique du barreau en équilibre et le plan méridien du lieu, ou tout autre plan vertical dont on détermine l'azimut. En remplaçant d'abord le barreau aimanté par un prisme de cuivre parfaitement semblable, on s'assure, en visant ces réticules dans le microscope, que lorsque le fil est sans torsion, le plau vertical passant par l'axe optique du microscope contient l'axe du barreau. On replace alors l'aimant dans l'étrier et on fait tourner toute la partie mobile de l'instrument jusqu'à ce que l'on voie coïncider avec le fil qui dans le microscope détermine son axe optique, le point de croisement des fils du barreau immobile et par conséquent en équilibre; à ce moment, le plan vertical passant par l'axe optique est le plan du méridien magnétique, si nous admettons toutefois que l'axe magnétique du barreau est le même que son axe de figure. La même opération, répétée après avoir retourné l'aimant, donne rigoureusement le méridien magnétique; il ne reste plus maintenant qu'à mesurer l'angle dont il faut faire tourner le système mobile pour que ce même axe optique vienne passer soit par une étoile, soit par un objet dont on connaisse la position. Or, pour cela il faut que le microscope, tout en conservant son axe, se transforme en une lunette, et c'est dans ce but que son objectif est formé de deux parties différentes : l'une centrale, beaucoup plus convexe, formant à elle seule l'objectif du microscope; et l'autre périphérique, plus aplatie, formant l'objectif d'une lunette astronomique. Un diaphragme qui couvre à volonté l'une ou l'autre de ces deux parties rend la lunette propre à l'usage qu'on en veut faire. Nous n'avons pas parlé des précautions qu'il faut prendre pour rendre l'instrument horizontal, ni du nombre de fois qu'il convient de répéter l'observation pour en rendre le résultat le plus exact possible; il faut à cet égard appliquer les mêmes règles qui régissent l'usage des instruments d'astronomie.

Quand il s'agit, non plus d'observer la déclinaison absolue, mais les variations de la déclinaison, il faut un instrument un peu différent dont voici la description. Deux colonnes fixes (fig. 356) supportent un treuil autour duquel est enroulé le fil

qui porte le barreau aimanté ; ce barreau est terminé à chacune de ses extrémités par une plaque en ivoire sur laquelle est

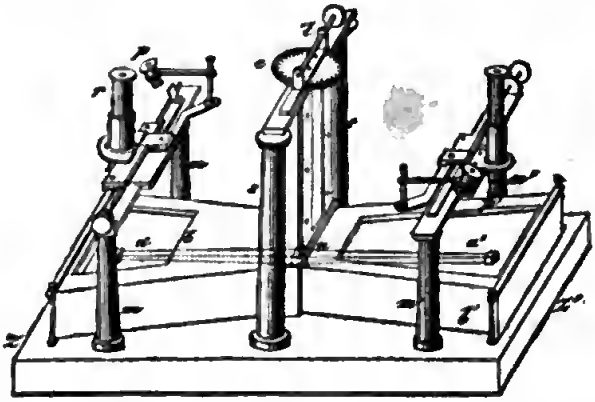


Fig. 356.

tracée une division en quarts de millimètre symétriquement autour de son axe. Un microscope, mobile au moyen d'une vis de rappel le long d'une échelle sur laquelle est disposée une loupe pour faciliter les lectures, sert à observer la marche de chacune des extrémités du barreau ; enfin, une boîte qui contient l'aimant et un cadre à glaces qui recouvre le fil, mettent l'appareil à l'abri des courants d'air. Pour se servir de cet instrument, après avoir nivelé le barreau et amené les fils intérieurs des microscopes en coïncidence avec l'axe, on mesure les variations de la déclinaison, soit en comptant les divisions de l'échelle gravée sur la plaque d'ivoire, qui passent sous le fil du microscope, soit en tournant la vis de rappel du microscope, de manière à faire rester son réticule en coïncidence avec l'axe du barreau, et en lisant ensuite de combien on l'a avancé ou reculé.

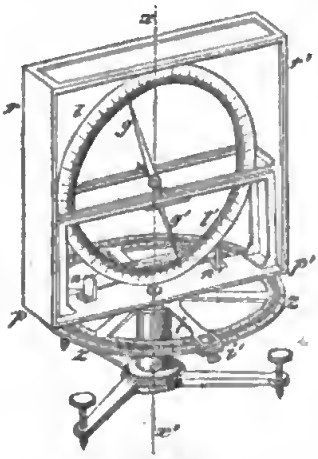


Fig. 357.

La boussole d'inclinaison dont nous avons déjà donné une description abrégée dans notre premier volume[1], se compose (fig. 357) d'un

[1] Tome I, page 157, figure 14.

cercle horizontal divisé en demi-degrés et donnant la minute au moyen de verniers, sur lequel se meut une alidade fixée à une plaque solide. Sur cette plaque s'élèvent deux colonnes qui supportent un double châssis et un cercle vertical; le châssis extérieur est fixe, tandis que le châssis intérieur est mobile autour d'une de ses extrémités, et sert à ramener, par le mouvement dont il est susceptible, le centre de l'aiguille en coïncidence avec le centre du cercle vertical. L'axe de l'aiguille passe dans deux entailles qui la soutiennent lorsqu'on n'observe pas, et ses pivots viennent s'appuyer sur des petits plans en agate ou en cristal de roche. Indiquons maintenant les précautions qu'il faut prendre pour la détermination de l'inclinaison, point important que nous n'avions pas traité, quand nous avons parlé dans le tome Ier de la boussole d'inclinaison. On sait qu'il est très-rare de trouver une aiguille dont le centre de gravité coïncide parfaitement avec le centre de suspension, d'où il résulte que la direction que prend l'aiguille est la résultante des deux forces qui agissent sur elle, l'une le magnétisme terrestre et l'autre la pesanteur; c'est pour cela qu'il devient nécessaire de retourner les pôles de l'aiguille. Mais il faut bien remarquer que la moyenne des valeurs trouvées pour l'inclinaison avant et après le retournement des pôles, ne doit donner l'inclinaison vraie qu'autant que la distribution de la force magnétique dans l'aiguille est parfaitement symétrique et n'est point altérée par le renversement des pôles; or c'est ce qui n'a pas toujours lieu, surtout quand l'aiguille dont on se sert est nouvelle, en sorte qu'il serait plus prudent, avant de remettre l'aiguille en expérience, de la faire osciller pour s'assurer que sa force magnétique est restée la même. Une seconde cause d'erreur est la non coïncidence de l'axe magnétique avec l'axe de figure de l'aiguille; on en tient compte en retournant l'aiguille sur ses tourillons avant et après le renversement des pôles, en sorte qu'une observation d'inclinaison exige, suivant cette méthode, quatre mesures d'angles. Mais pour que la moyenne de ces quatre observations soit exacte, il faut admettre que le diamètre du cercle divisé, qui passe par la division 90°, est vertical; s'il

en était autrement, l'angle compris entre la verticale et ce diamètre donnerait une erreur sur le résultat observé; il importe d'éliminer cette erreur, et le moyen le plus sûr d'y parvenir est d'opérer chaque fois le retournement de tout l'instrument qui doit être mobile autour d'un axe vertical, et muni de niveaux permettant de s'assurer que cet axe reste vertical pendant le retournement. L'observation complète de l'inclinaison se compose ainsi de huit observations au lieu de quatre.

L'intensité est celui des éléments du magnétisme terrestre dont la détermination présente les plus grandes difficultés. En effet, la valeur de la force directrice qui agit sur une aiguille et qui peut être mesurée par divers procédés, ne dépend pas seulement de l'intensité du magnétisme terrestre, mais aussi de l'état magnétique de l'aiguille elle-même. Il en résulte que la détermination de cette force directrice sur une même aiguille en différents points du globe, ne pourra faire connaître les intensités relatives du magnétisme terrestre en ces différents lieux, qu'autant que l'état magnétique de cette aiguille sera resté invariable durant tout le cours de ces observations, ce qui est très-rare, ou qu'on pourra connaître la manière dont il a varié, ce qui est extrêmement difficile. On comprend donc l'importance qu'il y avait à pouvoir mesurer d'une manière absolue l'intensité magnétique, indépendamment des aiguilles qui serviraient à cette détermination. Poisson avait déjà appliqué le calcul à cette question, et résolu le problème en indiquant une méthode à suivre fondée sur l'emploi simultané de deux aiguilles; mais c'est Gauss qui, le premier, en suivant une marche analogue, a rendu pratique une conception qui, jusqu'à lui, avait paru purement spéculative[1]. Nous reviendrons sur l'application de cette méthode, et, en général, sur le mode à suivre pour se mettre à l'abri de la cause d'erreur que nous venons de signaler; mais auparavant il nous faut décrire les procédés mêmes au moyen desquels on mesure la force directrice du magnétisme terrestre.

Jusqu'à l'invention du magnétomètre bifilaire au moyen

[1] Voyez la note finale A, pour le développement de cette méthode.

duquel Gauss a pu la déterminer avec une extrême précision, comme nous le verrons plus loin, en fonction d'une résistance étrangère qui maintient un barreau aimanté hors de sa position d'équilibre, la seule méthode connue consistait à faire osciller une aiguille aimantée. C'est à ce procédé que l'on doit la presque totalité des observations faites jusqu'à ce jour; il comporte des instruments beaucoup plus portatifs que le magnétomètre, et qui peuvent être appliqués, quoique avec moins de précision, il est vrai, à la recherche de l'intensité absolue [1].

La force directrice du globe s'exerçant suivant la direction de l'aiguille d'inclinaison, il faut, pour trouver directement l'intensité de cette force, ou plutôt le rapport des intensités de cette force en deux lieux différents, faire osciller l'aiguille d'inclinaison autour de sa position d'équilibre. Si n et n' sont les nombres d'oscillations exécutées dans le même temps par l'aiguille, en désignant par G et G' les intensités correspondantes, on a :

$$\frac{G}{G'} = \frac{n^2}{n'^2}$$

Cette méthode a été suivie par plusieurs observateurs, et en particulier par M. de Humboldt, mais elle n'est exacte qu'autant que le poids de l'aiguille est entièrement supprimé; en outre, le frottement qui est considérable dans ce mode de suspension, et peut-être aussi le magnétisme de rotation, contribuent à arrêter l'aiguille.

Il est donc préférable, comme on l'a généralement pratiqué, de faire osciller l'aiguille de déclinaison; on détermine ainsi la composante horizontale de la force directrice, et si g et g' représentent maintenant les composantes horizontales en deux lieux où l'on ait en même temps observé les inclinaisons I et I', les forces directrices totales G et G' auront pour rapport :

$$\frac{G}{G'} = \frac{g}{g'} \quad \frac{\cos. I'}{\cos. I}$$

La boussole d'intensité de M. Gambey (fig. 358) présente

[1] Voyez la note A.

une caisse ronde de bois qui est percée de deux ouvertures diamétralement opposées. Le microscope sert à compter les oscillations de l'aiguille lorsqu'elles deviennent très-petites.

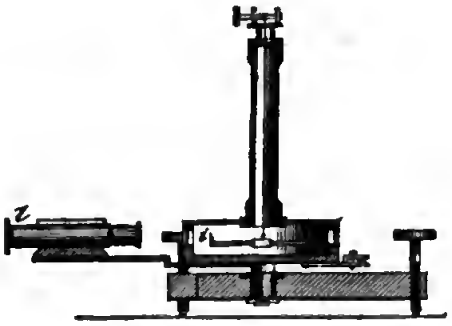


Fig. 358.

Un arc gradué que parcourt l'extrémité de l'aiguille mesure les amplitudes et la manière dont elles décroissent. Le fil auquel est suspendue l'aiguille doit être un fil de cocon bien délié, de manière à n'opposer par sa torsion qu'une très-faible résistance aux mouvements de l'aimant. Tous les appareils qui ont servi aux observations d'intensité ont la plus grande analogie avec celui-ci, et se composent toujours essentiellement d'une aiguille de déclinaison dont on peut compter les oscillations.

Voici maintenant, en quelques mots, la manière de procéder dans ces observations. On s'assure que l'aiguille est horizontale, et on l'écarte de sa position d'équilibre autant que possible dans un plan horizontal, d'un angle d'environ 20°, car si la déviation primitive était moindre, on ne pourrait pas compter un nombre suffisant d'oscillations, ce qui nuirait à l'exactitude du résultat. Mais, d'un autre côté, la formule du pendule dont on se sert pour trouver l'intensité de la force directrice qui agit sur l'aiguille n'est rigoureuse que pour des oscillations infiniment petites, en sorte qu'il faut corriger le résultat, c'est-à-dire la durée observée pour un certain nombre d'oscillations, au moyen d'une formule dans laquelle entrent l'amplitude des oscillations et la manière dont cette amplitude a diminué; on

doit aussi tenir compte de la raideur du fil auquel est suspendue l'aiguille, et on y arrive en remplaçant l'aiguille aimantée par une aiguille de cuivre de même forme et de même poids, dont on observe les oscillations; on obtient ainsi la durée de l'oscillation corrigée. Il est évident que pour ces observations, comme pour toutes celles où le temps est une des données de la question, il faut pouvoir l'évaluer avec une grande exactitude. Il est encore un élément très-important à déterminer, qui est la température de l'aiguille pendant l'expérience; on sait en effet que le magnétisme d'un aimant diminue à mesure que la température s'élève; il faut donc tenir compte de cette cause d'altération dans la durée des oscillations et pouvoir ramener toutes les observations destinées à être comparées entre elles à une même température; pour cela, chaque aiguille dont on se sert doit être soumise à un certain nombre d'expériences; on la fait osciller en la maintenant successivement à des températures différentes, et, si on a soin de choisir toujours la même heure de la journée, on peut admettre que la force magnétique terrestre est la même pour toutes les expériences et que les différences dans la durée des oscillations sont dues uniquement aux différences de température; on détermine ainsi les constantes d'une formule de correction; c'est ce que M. Kupffer a fait avec beaucoup de soin. Enfin, nous avons déjà dit qu'il est essentiel que l'aiguille aimantée conserve sa force sans aucune altération durant une série d'expériences comparables, ou du moins qu'au commencement et à la fin, des expériences soient faites dans un même lieu, afin qu'on puisse vérifier les altérations survenues, et, si elles n'étaient pas trop abondantes, corriger les résultats par voie d'interpolation.

Lorsqu'il s'agit d'observations à faire dans un même lieu, il y a un grand avantage à se servir d'une nouvelle classe d'instruments magnétiques de beaucoup supérieurs aux anciens, à la fois par la sensibilité et par l'exactitude, et qui ont été imaginés par Gauss; ces appareils sont depuis longtemps employés à l'Observatoire magnétique de Gœttingue, où ils ont été établis pour la première fois; leur usage s'est promptement répandu dans toute l'Allemagne, et de là successivement dans

tous les observatoires; c'est seulement au moyen de ces instruments qui permettent de donner aux observations magnétiques l'exactitude astronomique, qu'on a pu acquérir des notions vraiment importantes sur les variations des éléments du magnétisme terrestre. Leur sensibilité tient soit à la grandeur des aimants qu'on emploie, soit au mode de suspension; leur exactitude est due à l'appareil particulier au moyen duquel on observe.

Le premier de ces appareils est le *magnétomètre unifilaire* ou *de déclinaison*, dont voici la description. Dans une salle convenablement disposée, et pour la construction de laquelle on doit avoir évité tout emploi du fer, on trace (fig. 359) une ligne suivant la direction du méridien magnétique; c'est en deux points

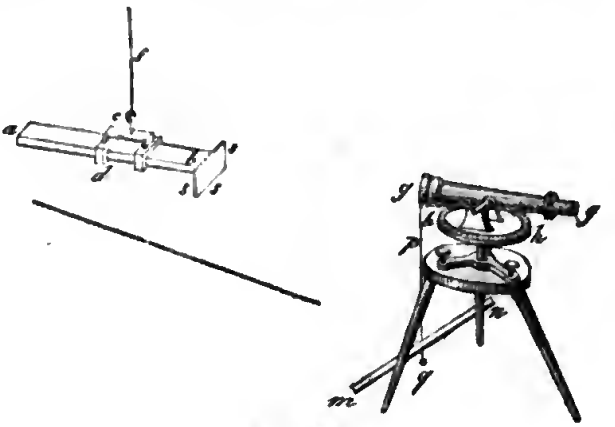


Fig. 359.

de cette ligne que sont placés, d'une part, le barreau aimanté *a b* suspendu à l'extrémité d'un fil *cf* qui va s'enrouler autour d'un petit treuil fixé au plafond, et de l'autre, à une distance d'environ 5 mètres, un théodolite *p n* avec sa lunette *gg* dont l'axe optique est dans le méridien magnétique. Le barreau aimanté, long environ de 600 millimètres, porte à celle de ses extrémités qui regarde le théodolite, un miroir plan *ss* vertical perpendiculaire à son axe magnétique; enfin au-dessous du théodolite on dispose horizontalement une règle divisée *mn*, faisant face au miroir et dont le zéro soit sur la verticale *pq* passant par l'objectif de la lunette; ce sont les divisions de cette règle dont on

regarde l'image dans le miroir du barreau; si son axe magnétique est parallèle à la ligne qui a été tracée, le miroir lui est normal, par conséquent parallèle à la règle divisée, et c'est l'image du zéro, qui vient coïncider avec le point de croisement des fils de la lunette; mais lorsque le barreau est dévié, c'est l'image d'un autre point de l'échelle qui se trouve sur l'axe optique, et il est facile de déduire de la longueur comprise entre le zéro et la division que l'on voit, en même temps que de la distance de la règle au miroir, l'angle dont on a tourné le barreau. Il faut remarquer que ce mode d'observation présente l'avantage que, parmi tous les mouvements dont est nécessairement susceptible le barreau et par conséquent aussi le miroir, le mouvement angulaire, dans un plan horizontal, est le seul qui influe sur la lecture de l'échelle. Sans vouloir entrer dans tous les détails que comporterait la description complète de cet appareil, nous ajouterons quelques mots sur les principales parties qui le composent, et dont les figures 360 et 361 donnent la projection verticale et la projection horizontale. Le fil est

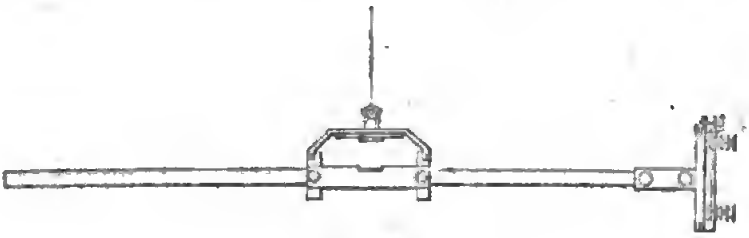


Fig. 360.

Fig. 361.

formé de fils de cocon en nombre suffisant pour pouvoir supporter avec le barreau un poids de 1 kilogramme qu'on ajoute dans la recherche du moment d'inertie. Le fil n'est pas fixé directement à l'étrier qui supporte le barreau, mais à un cercle horizontal appelé cercle de torsion, et sur lequel repose l'étrier,

de telle manière qu'en tournant ce cercle on peut amener le fil à être sans torsion, tout en laissant au barreau la direction que l'on veut. Tout l'appareil est renfermé dans une boîte cylindrique dont le couvercle laisse passer le fil de suspension, et qui présente une ouverture latérale vis-à-vis du miroir.

De la grande sensibilité du magnétomètre, il résulte que le barreau est toujours en mouvement, que par conséquent il faut remplacer les observations immédiates par des observations indirectes qui n'exigent pas un repos complet, et déduire des oscillations de l'aimant la position qu'il occuperait si, à cet instant, il était en équilibre. Le procédé le plus simple serait de prendre le bissectrice de l'angle des deux positions successives et extrêmes du barreau, mais il est loin d'être exact dès que l'oscillation a une certaine amplitude, car dans ce cas l'amplitude diminue pendant la durée même de l'oscillation, et la direction d'équilibre est moins rapprochée de la première position extrême que de la dernière; si celle-ci est prise pour point de départ d'une seconde oscillation, la direction d'équilibre, déterminée de la même manière que la première fois, s'écartera du même angle de la direction réelle, mais en sens contraire; il faut donc prendre la moyenne des deux moyennes successives. Nous dirons enfin que pour observer les variations de la déclinaison, il suffira d'un télescope qui puisse être mu dans un plan vertical, et braqué à volonté sur le miroir et sur un point de mire disposé à une distance convenable dans le plan vertical passant par la ligne tracée primitivement, afin que l'observateur puisse s'assurer que son instrument n'a pas été dérangé. Pour mesurer des déclinaisons absolues, on se sert d'un théodolite au moyen duquel on peut viser un objet dont l'azimuth, par rapport au méridien du lieu, est déterminé d'avance.

Le second des appareils imaginés par Gauss est le *magnétomètre bifilaire*. Il était naturel de supposer que l'intensité de la force magnétique était, tout autant que sa direction, soumise à des variations continuelles; or les observations d'intensité dont nous avons parlé ne peuvent servir qu'à déterminer sa valeur moyenne pendant le temps que dure l'expérience, et il est im-

possible de trop raccourcir ce temps sans courir le risque de commettre une erreur sensible sur la durée de l'oscillation; il était donc indispensable, pour étudier les variations de l'intensité magnétique, de recourir à un nouveau moyen; c'est ce qu'a fait Gauss en inventant le magnétomètre bifilaire. Lorsqu'un corps, suspendu par deux fils, est soumis uniquement à l'action de la pesanteur, il se met en équilibre dans une position déterminée par les conditions particulières auxquelles satisfont les points d'attache des fils et le centre de gravité du corps lui-même. Si on le dérange de sa position d'équilibre, il tend à y revenir en vertu de la pesanteur qui se transforme ici en une force directrice. Supposons maintenant que ce corps soit une aiguille aimantée; elle prendra une position d'équilibre intermédiaire entre celle qui dépendrait uniquement du mode de suspension, et la direction du méridien magnétique; et, dans cette position, on saura que le moment magnétique est précisément égal et contraire à celui de la pesanteur, que l'on peut calculer[1], et d'où l'on déduit, par conséquent, la force directrice qui agit sur l'aiguille. Si son intensité vient à changer, la position d'équilibre changera aussi, et ses variations se traduiront ainsi en variations angulaires. On dispose l'instrument de manière que, pour une valeur moyenne de l'intensité, le barreau, dans sa position d'équilibre, soit perpendiculaire au méridien magnétique; il en résulte que les petits changements de déclinaison n'ont sur cette position aucune influence, tandis que les moindres variations dans l'intensité l'affectent immédiatement. Le mode d'ob-

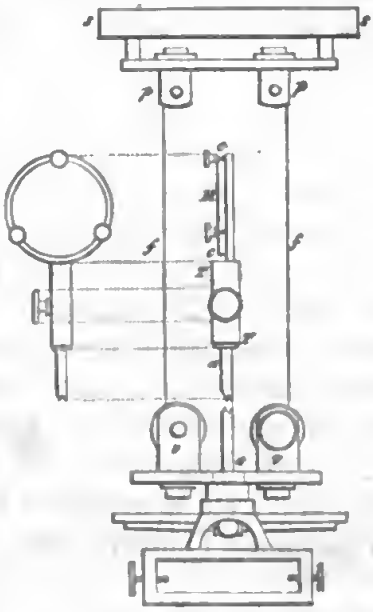


Fig. 362.

[1] Voyez note finale B.

servation est le même que pour le magnétomètre de déclinaison, c'est-à-dire que l'on vise dans un miroir, fixé au barreau, l'image d'une règle divisée; les fils sont en acier, et viennent s'attacher en deux points du diamètre d'un cercle divisé, sur lequel (fig. 362) peuvent tourner deux alidades munies de vernier, dont l'une porte un miroir vertical mobile autour d'un axe vertical, et l'autre l'étrier dans lequel se place le barreau [1]; les diverses parties de l'instrument doivent être considérées comme liées invariablement les unes aux autres, lorsqu'on observe les variations de l'intensité; et ce n'est que pour la détermination de l'intensité elle-même, qu'on se sert des mouvements de rotation dont elles sont suceptibles. Nous verrons, quand nous nous occuperons du procédé photographique pour l'enregistrement des observations, comment on peut se mettre à l'abri de l'influence de la température, qui risquerait d'altérer les résultats.

La déclinaison et l'intensité horizontale, une fois déterminées au moyen des deux magnétomètres, il faudrait, pour rendre l'observation complète, connaître l'inclinaison; il suffit, pour cela, de déterminer la composante verticale de la force magnétique, puisque le rapport de la force verticale à la force horizontale du magnétisme terrestre n'est autre que la tangente de l'inclinaison [2]. C'est dans ce but qu'a été construit l'instrument connu sous le nom de magnétomètre-balance. Il se compose d'une aiguille aimantée, reposant sur des plans d'agate, au moyen de couteaux, et amenée par un contre-poids à être horizontale; un miroir lui est fixé, et le mode d'observation est le même que dans les deux autres magnétomètres, si ce n'est que la déviation observée a lieu dans un plan vertical. Cet appareil est très-inférieur, au point de vue de l'exactitude, aux deux autres précédemment décrits, et il a été abandonné à l'Observatoire de Bruxelles; mais on continue à l'observer dans ceux de Greenwich et de Paris.

[1] Voyez tome I, page 590.

[2] Dans la fig. 362 le miroir est représenté dans deux plans différents perpendiculaires l'un à l'autre et tous deux verticaux.

Quand on eut établi dans un grand nombre d'observatoires magnétiques des instruments assez sensibles pour accuser les moindres variations des éléments du magnétisme terrestre, on comprit bien vite la nécessité d'observer les phénomènes à des intervalles beaucoup plus rapprochés qu'on ne l'avait fait jusqu'alors, et on fut conduit ainsi à inventer des appareils dans lesquels les observations pussent s'enregistrer d'elles-mêmes. Il existe maintenant deux systèmes principaux d'instruments enregistreurs, ceux dans lesquels les indications sont obtenues par des appareils mécaniques, et ceux dans lesquels l'inscription se fait par le moyen de la photographie. Le premier système a été employé longtemps dans plusieurs observatoires, et notamment à celui de Bruxelles où il a donné d'excellents résultats; il varie beaucoup dans ses détails, mais quelque perfection qu'on apporte dans la construction des appareils, il est impossible d'éviter que la sensibilité des instruments ne soit plus ou moins altérée par l'intervention et l'inertie des pièces indicatrices.

Le système photographique ne présente pas cet inconvénient. Aussi, après avoir été installé à Greenwich et à Toronto par M. Brooke son inventeur, il vient d'être adopté par M. Leverrier à l'Observatoire de Paris où il a été établi par M. Liais, d'après le plan de M. Brooke, mais avec quelques modifications heureuses pour permettre les observations directes et les déterminations absolues. Au moyen d'un théodolite excellent, bien exécuté, on peut toujours, quand on veut, obtenir facilement la déclinaison absolue; les précautions de stabilité prises dans ce but sont toutes celles d'un observatoire astronomique. Dans un pavillon isolé, situé à l'angle sud-est de l'Observatoire, on a placé un magnétomètre de déclinaison, un magnétomètre bifilaire et un magnétomètre-balance. Le barreau aimanté du magnétomètre de déclinaison est un cylindre creux de 20 centimètres de longueur; disposition qui présente l'avantage de fournir des aimants puissants d'un faible poids; car on sait qu'à partir d'une certaine limite d'épaisseur, un cylindre creux s'aimante à peu près au même degré qu'un cylindre plein. Le barreau étant creux, on en fait une lunette-collimateur; il

porte, à l'une de ses extrémités, au sud, une lentille; à l'autre, au nord, une échelle horizontale divisée, qui est au foyer principal de la lentille; les rayons qui en émanent sortent parallèles, de sorte que l'échelle est visible avec le théodolite.

Voici maintenant comment s'opère le tracé photographique. Le barreau supporte un miroir concave en métal qui se meut avec lui. A soixante-cinq centimètres de ce miroir se trouve un bec de gaz dont la cheminée présente une fente verticale du côté du miroir. Les rayons émanés de cette fente et réfléchis par le miroir forment à trois mètres du miroir, au foyer conjugué, une image de la fente verticale. La fente n'est pas sur l'axe même du miroir, afin d'éviter que les rayons réfléchis ne soient interceptés par la cheminée; mais elle est légèrement déviée. Par cette disposition, on voit que l'image de la fente se meut horizontalement, par rapport au centre de la boussole, d'un angle double de celui du barreau. Un système de deux lentilles cylindriques de trente centimètres de longueur, et à court foyer, est disposé horizontalement, de manière à concentrer en un point lumineux l'image de la fente, sans cependant réagir sur la direction de ce point. Ces lentilles auraient été inutiles si la source de lumière avait été un point au lieu d'une fente, mais alors on n'aurait pas eu assez de lumière pour obtenir un tracé photographique.

Derrière les lentilles cylindriques se trouve un cylindre de vingt centimètres de diamètre, recouvert de papier photographique, et auquel un chronomètre imprime une rotation d'un tour en vingt-quatre heures. Ce cylindre reçoit le point lumineux dont les déplacements ont lieu parallèlement à son axe. Le cylindre étant animé d'un mouvement de rotation, le point lumineux décrit à sa surface une courbe qui impressionne le papier sensible.

Sur la monture du cylindre se trouve une lentille munie d'un prisme, au moyen de laquelle un second bec de gaz, fixé sur le même pilier que ce cylindre, trace photographiquement une ligne de repère. C'est la variation de la distance entre cette ligne de repère et la courbe, distance indépendante de la position donnée au papier sur le cylindre, qui fait connaître les

changements de la déclinaison. Un obturateur permet de faire sur la courbe de petites interruptions qui servent à fournir des repères pour régler l'échelle des heures.

Sur le même cylindre enregistreur se trouve, du côté opposé au point lumineux fourni par la boussole de déclinaison, un troisième point lumineux qui trace la courbe des variations de la force horizontale. Ce troisième point est fourni par le magnétomètre bifilaire, placé sur un pilier à l'angle sud-ouest du pavillon.

Un barreau semblable à celui de la boussole de déclinaison est maintenu par une suspension à deux fils, dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Son pôle nord, celui qui porte l'échelle divisée, est à l'ouest. Ce barreau est observable avec le même théodolite que la boussole de déclinaison. Cette disposition permet de déterminer rapidement, en un instant quelconque, la situation exacte de l'axe magnétique de ce barreau par rapport au méridien astronomique. En faisant cette détermination pour diverses lectures du cercle de torsion, on en peut déduire l'angle de torsion nécessaire pour amener l'axe magnétique dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique. Connaissant alors le poids de l'appareil, l'écartement des crochets de suspension et la longueur du faisceau, on a, en fonction de la pesanteur, la valeur du couple de torsion qui fait équilibre au couple magnétique; ce dernier couple a pour mesure le produit du moment magnétique du barreau par la force horizontale du globe. Si alors on dévie, suivant la méthode de Gauss, la boussole de déclinaison avec le barreau bifilaire, pour en déduire le rapport du moment magnétique de ce barreau à la force du globe, on a les éléments nécessaires pour obtenir la mesure de la force horizontale du globe.

Les faisceaux de suspension du magnétomètre bifilaire sont renfermés dans un tube de verre; ils ont un mètre de longueur. Le barreau est renfermé dans une boîte octogone en glace, semblable à celle de la boussole de déclinaison. Le barreau est également placé entre deux planches de cuivre et porte, pour l'enregistrement photographique, un miroir concave en tout semblable à celui de la boussole de déclinaison.

Le moment magnétique d'un barreau aimanté changeant avec la température, et la situation du barreau dépendant du produit de ce moment magnétique par la force du globe, il en résulterait la nécessité de corriger les courbes des influences de la température, point par point, si l'on n'avait compensé l'instrument contre les effets de la chaleur. M. Brooke a obtenu cette compensation en faisant varier le couple de torsion, sous l'influence de la température dans le même rapport que le magnétisme du barreau dont les variations ont été préalablement déterminées par expérience. Il a suffi pour cela de faire en sorte que les deux crochets de suspension se rapprochent quand la température s'élève, effet que l'on a obtenu par l'inégalité de dilatation du verre et du zinc. L'instrument peut à volonté fonctionner avec ou sans compensation.

Le magnétomètre de force verticale est placé à l'est du pavillon. Il consiste en un barreau collimateur semblable à ceux des deux autres instruments, et supporté sur un plan d'agate par une suspension de balance à couteaux d'acier. Ces couteaux sont dans le méridien magnétique, de sorte que le barreau se meut dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Son magnétisme tendrait alors à le rendre vertical, mais un contre-poids le maintient horizontal. Les variations de la force verticale du magnétisme font incliner cet instrument comme une balance; sa sensibilité dépend de l'abaissement du centre de gravité et se règle à volonté. Comme pour le magnétomètre bifilaire il faut une compensation contre les effets de la température; cette compensation est obtenue par un thermomètre porté par le barreau, et dont les dimensions ont été déterminées par M. Brooke, d'après l'étude des variations du magnétisme du barreau. Quand la température s'élève, l'élévation du thermomètre augmente le poids du côté du pôle nord du barreau. Ce thermomètre peut être enlevé à volonté. La situation de l'axe magnétique par rapport à l'horizon et au méridien magnétique peut être sans cesse déterminée par le théodolite.

L'enregistrement photographique se fait comme pour les deux autres instruments, sauf que le mouvement du point

lumineux, au lieu d'avoir lieu dans un plan horizontal, a lieu dans un plan vertical. Cette condition a forcé à employer un cylindre différent de celui qui sert aux deux autres instruments.

La préparation des papiers photographiques n'est pas un obstacle à l'emploi des instruments à indications continues. A l'Observatoire de Paris, on a abandonné les procédés humides qui obligeaient à préparer le papier chaque jour et à faire paraître immédiatement les épreuves; on a également abandonné les papiers cirés, qui sont dispendieux et longs à préparer à cause du séjour prolongé qu'il faut leur faire subir sur un bain. On a tenu à obtenir des épreuves sur papier ordinaire et sec. En quelques heures on peut préparer du papier pour quinze jours, et se contenter de faire paraître les épreuves à l'acide gallique à la fin de chaque semaine.

Le papier est sensibilisé avec l'iodure et le bromure d'ammonium, le nitrate d'argent et l'acide acétique. Après avoir été séché, il est conservé à l'abri de la lumière, et est en état d'être employé. Les feuilles retirées des cylindres sont conservées. On fait paraître les images avec l'acide gallique dilué, et on les fixe à l'hyposulfite de soude.

§ 2. Résultats des observations relatives à la détermination des éléments du magnétisme terrestre et de leurs variations.

Après avoir décrit les principaux instruments destinés aux observations de magnétisme terrestre, nous allons passer à l'exposition des résultats déjà nombreux que ces observations ont fournis.

Halley est le premier physicien qui paraisse s'être fait une idée juste de ce que c'est que le magnétisme terrestre; il publia une carte des lignes de déclinaison de l'aiguille aimantée en 1701, à son retour d'un voyage maritime entrepris dans le but spécial de faire des observations magnétiques, dans lequel il visita les côtes *est* et *ouest* de l'océan Atlantique et plusieurs îles de l'un et l'autre hémisphère, aussi loin que les glaces lui permirent d'avancer. Indépendamment de ses propres observations, Halley recueillait avec soin toutes les observations dignes

de confiance faites par d'autres. A partir de Halley les savants continuèrent à s'occuper des questions relatives au magnétisme terrestre, mais c'est surtout depuis quarante ans environ que cette étude a pris un développement tout particulier. Déjà les travaux importants de M. de Humboldt avaient, comme nous le verrons, fourni des données précieuses sur le sujet, quand M. Hansteen publia à Christiania, en 1819, son grand ouvrage intitulé *Magnétisme de la terre*, où, réunissant sous un seul coup d'œil toutes les observations antérieures, il traça les cartes de la déclinaison pour les années 1600, 1700, 1710, 1720, 1730, 1744, 1756, 1787 et 1800, et celles de l'inclinaison pour les années 1600, 1700 et 1780. M. Hansteen a continué dès lors, et continue encore à apporter sans interruption un contingent important de travaux à cette partie si intéressante de la physique terrestre. Les recherches relatives à l'intensité ont commencé seulement à la fin du dernier siècle par les observations de M. de Rossel, dans le voyage d'Encastreaux, puis, plus tard, par les travaux plus nombreux et plus précis de M. de Humboldt; un grand nombre de physiciens se sont dès lors occupés à déterminer la valeur en divers lieux de cet élément du magnétisme terrestre; mais la première carte générale des lignes d'égale force magnétique sur le globe a été publiée, en 1837, par le colonel Sabine qui s'est livré avec une ardeur et une activité non interrompues depuis près de quarante ans à l'étude du magnétisme terrestre; étude dans laquelle il débuta par quatre expéditions scientifiques successives de 1818 à 1822. Parmi les autres voyages fructueux pour l'avancement de cette partie de la science, notons aussi en première ligne celui du capitaine Duperrey sur la *Coquille*, de 1822 à 1825, entrepris dans le but de tracer tout autour de la partie océanique du globe les lignes de déclinaison nulle; l'expédition faite par MM. Hansteen, Ermann et Due, de 1827 à 1829, dans la Sibérie orientale, pour déterminer à cette époque la position du pôle magnétique le plus faible dans l'hémisphère nord; l'expédition de 1840 à 1845 du capitaine J. Ross, et, plus tard, celles des capitaines Moore et Clark en vue de connaître les positions des pôles sud de la force magnétique, et plus généralement de recueillir les maté-

riaux nécessaires au tracé des cartes magnétiques dans l'hémisphère sud; le voyage et le séjour de MM. Bravais et Lottin dans les régions polaires, et en particulier leurs observations magnétiques à Bossekop (Finmarle); la triangulation magnétique des possessions britanniques dans l'Amérique du Nord, faite par le lieutenant-colonel Lefroy, de 1843 à 1844; et enfin celle de l'archipel indien, entreprise par le capitaine Elliot, de 1846 à 1850, aux frais de la compagnie des Indes, et qui avait pour objet d'obtenir une carte magnétique exacte des trois éléments, dans cette région du globe où ils n'avaient jamais été étudiés. A ces diverses expéditions, il faudrait, pour être complet, ajouter encore les observations magnétiques faites depuis quelques années, par de nombreux voyageurs et navigateurs, et dont plusieurs nous serviront également.

A côté des voyages et des expéditions nous ne devons pas oublier, comme ayant rendu un grand service à la science, l'établissement de nombreux observatoires magnétiques sur différents points du globe, et dont la multiplication fut essentiellement provoquée par la lettre, d'avril 1836, de M. de Humboldt au duc de Sussex, président alors de la Société Royale de Londres. M. de Humboldt insistait dans sa lettre sur l'utilité d'augmenter le nombre des stations permanentes, afin d'avoir le plus grand nombre d'observations correspondantes; avantage très-grand surtout en ce qui concerne les variations dont on peut ainsi étudier la simultanéité. Plusieurs observatoires magnétiques furent institués alors en addition de ceux qui existaient déjà et dont le plus remarquable était l'Observatoire de Goettingue dirigé par Gauss et Weber. Parmi ceux institués récemment, nous en citerons principalement quatre qui ont été choisis de manière à se trouver dans des circonstances très-différentes d'intensité magnétique, et dans une position opposée par rapport aux pôles et aux équateurs magnétique et géographique. Le premier de ces observatoires a été construit à Toronto (Canada), et le second à Hobart-Town (terre de Van-Diémen). Ces deux stations ont été choisies parce qu'elles sont situées à peu près aux antipodes l'une de l'autre, et qu'elles sont assez rapprochées des points où la force magnétique possède son maxi-

mum d'intensité. Le troisième observatoire a été établi au Cap de Bonne-Espérance, point important à cause de sa situation à l'extrémité méridionale de l'Afrique, et parce que les éléments magnétiques y subissent de grandes variations. Enfin le quatrième observatoire a été placé à Sainte-Hélène, entre les deux tropiques, à une petite distance de l'équateur, et dans un lieu où l'intensité magnétique est faible. C'est sous la direction du colonel Sabine, que se poursuivent dans ces observatoires de nombreuses observations.

Au moyen de toutes ces ressources jointes à la perfection des instruments employés et que nous avons décrits dans notre paragraphe premier, on est parvenu à déterminer la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité magnétiques d'un très-grand nombre de points de la surface de la terre, et à tracer sur la sphère terrestre des lignes d'égale déclinaison ou *isogoniques*, d'égale inclinaison ou *isocliniques*, et d'égale intensité ou *isodynamiques*. Ce n'est pas seulement la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité qu'on a réussi à observer, mais aussi les variations continuelles que ces éléments éprouvent dans un même lieu, soit d'une année à l'autre, soit dans les divers mois d'une même année, soit dans les différentes heures d'un même jour.

Il importe en effet, quand on compare les observations faites en un lieu avec celles faites dans un autre, pour la détermination des éléments absolus, de connaître à quelles époques elles ont été faites, puisque dans un même lieu les trois éléments magnétiques ne demeurent point constants. Ainsi la déclinaison, qui est l'élément observé le plus anciennement, était à Paris, en 1580, époque la plus reculée à laquelle elle ait été déterminée, de 11°, 30′ à l'est; en 1653, l'aiguille se trouvait dans le méridien terrestre; la déclinaison est devenue dès lors occidentale, et elle a atteint son maximum (22°. 34′) en 1814, époque à partir de laquelle elle diminue chaque année. Il paraît, d'après d'anciennes observations, qu'en Belgique l'aiguille aimantée déviait, à l'est du méridien, de 15° environ en 1568, et que vers 1600 elle déviait encore de 9°. A Londres, et ce qui est assez curieux, au Cap de Bonne-Espérance, par conséquent dans l'autre hémisphère, la déclinaison a suivi une

marche semblable, c'est-à-dire que, d'abord à l'est, elle s'est portée ensuite à l'ouest; seulement, au Cap, elle aurait passé plus tôt à l'ouest, et aurait également atteint plus tôt son maximum à l'ouest, tandis qu'à Londres et à Paris les deux maxima, à l'ouest, ont eu lieu sensiblement à la même époque. A Londres, la déclinaison, qui, en 1576, était de 11° 15′ à l'est, était, en 1652-1667, de 0°, et de 24° 20′ en 1813 et 1814 (maximum). Au Cap, elle était de 0° 30′ à l'est, en 1605; de 25° 40′ à l'ouest, en 1791 (maximum); de 25° 4′ à l'ouest, en 1804. Nous verrons plus loin la loi que paraît suivre la diminution actuelle de la déclinaison, qui est environ de 6′ par année.

L'inclinaison de l'aiguille aimantée n'est point non plus constante dans le même lieu; mais elle éprouve, depuis près de deux siècles qu'on l'observe, une diminution régulière; ainsi, après avoir été, à Paris, de 75° en 1671, elle n'était plus que de 70° 52′ en 1791, et de 66° 25′ en 1851. L'inclinaison a diminué de même à Bruxelles régulièrement depuis 1827, où elle était de 68° 56′ 5″, jusqu'à 1854, époque à laquelle elle n'était plus que de 67° 45′. M. Hansteen croit que l'inclinaison atteindra un minimum à partir duquel elle cessera de diminuer pour recommencer à augmenter. Cet état minimum se trouve déjà atteint en Russie; il doit se présenter prochainement à Stockholm et à Christiana, puis plus tard à Copenhague, et dans les villes plus méridionales. M. Kupffer a trouvé une confirmation des idées de M. Hansteen dans les observations faites récemment en Sibérie et à Kasan, et surtout à Pékin où l'inclinaison augmente depuis longtemps. D'après les calculs de M. Quetelet, faits sur de nombreuses observations, la diminution annuelle de l'inclinaison est de 3′87 à Milan, de 3′8 à Pétersbourg, de 3′7 à Paris et à Berlin, de 3′56 à Christiania, de 3′5 à Turin, de 3′ 4 à Bruxelles, etc.

Quant à l'intensité, elle paraît bien aussi éprouver des variations; ainsi M. Arago a trouvé qu'elle allait en augmentant d'une année à une autre; mais cette augmentation, si elle existe, est très-faible, car M. Quetelet n'a pas aperçu que cet élément ait éprouvé d'altération bien sensible depuis un quart de siècle qu'il l'observe.

Les variations *séculaires* dont nous venons de parler sont tout à fait différentes des variations *annuelles* et des variations *diurnes*, sur lesquelles nous reviendrons quand nous aurons, en tenant compte des variations séculaires, jeté un coup d'œil sur l'état magnétique actuel, sous le rapport absolu, des différents points de notre globe.

Chaque lieu de la terre est donc caractérisé, au point de vue magnétique, par trois éléments : la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité. Nous pourrions nous contenter de donner une table qui renfermerait la valeur de ces trois éléments, pour tous les points du globe où ils ont été déterminés, en choisissant les déterminations faites, autant que possible, à la même époque. Mais ce procédé ne nous donnerait point une idée de l'ensemble de la distribution des forces magnétiques sur la surface de la terre; aussi préférons-nous suivre successivement, essentiellement avec M. Hansteen et avec M. Duperrey, qui ont employé des méthodes un peu différentes, la marche du magnétisme d'un point à un autre.

Admettant que, si l'aiguille aimantée prenait en tous les points de la terre la direction nord-sud, nous n'hésiterions pas à dire que la terre possède des pôles magnétiques qui coïncident avec les pôles géographiques, M. Hansteen est conduit à rechercher quelle doit être la position de ces pôles magnétiques pour rendre compte du fait constaté par des observations exactes que l'aiguille dévie du méridien, que cette déviation n'est pas la même partout, qu'elle est plus orientale en quelques lieux, plus occidentale dans d'autres, enfin qu'elle varie avec le temps dans un même lieu. La déclinaison est maintenant occidentale dans toute l'Europe; si donc, partant de Pétersbourg, où elle est de 8° à l'ouest, nous nous avançons de l'est à l'ouest, vers le Groënland, nous la voyons s'accroître, étant de 15°½ à Stockholm, de 20° à Christiana, de 24° à Londres, d'environ 40° sur la côte nord de l'Islande, et d'environ 51° dans la colonie de Godthaab, au Groënland. De la côte ouest du Groënland à la baie d'Hudson, elle décroît par degrés; puis, si l'on avance sur le continent, elle disparaît entièrement, devient orientale, et s'accroît rapidement vers la côte ouest

d'Amérique. En prolongeant les lignes qui indiquent les directions de l'aiguille aimantée, on voit qu'elles se rencontrent en un même point éloigné du pôle de la terre de 20°, et environ à 259° à l'est de Greenwich; ce qui donne, pour ce point, une latitude nord de 70° et une longitude ouest de 101°. Mais, d'un autre côté, si l'on suit, dans le nord, la côte de Norwége, on voit la déclinaison décroître, et enfin disparaître entièrement dans la mer Blanche; et, si l'on trace les prolongements des directions de l'aiguille en ces divers points, les lignes ne vont plus passer par le point déterminé plus haut; il en est de même des prolongements des directions de l'aiguille dans les parties septentrionales du détroit de Béring et dans la partie nord-est de la Sibérie. On est ainsi conduit à supposer quelque part, dans la mer de Sibérie, un second pôle magnétique, qui attire le pôle nord de l'aiguille vers l'est, entre le Spitzberg et la Norwége, vers l'ouest dans la Sibérie orientale et dans le détroit de Béring.

Il résulte de diverses observations recueillies par M. Hansteen que la déclinaison occidentale disparaissait entièrement en 1805 avant d'arriver à Kasan; de Kasan à Tobolsk la déclinaison orientale s'accroissait et elle décroissait de nouveau vers Irkutsh où elle n'était plus que d'un demi degré; plus à l'est elle doit entièrement disparaître, car à Jakutskoï, Billings[1] trouva en 1788 une déclinaison occidentale de 2°; enfin à l'est de Jakutskoï cette déclinaison occidentale disparaît encore et redevient orientale dans le Kamtschatka et dans toute la partie nord-ouest de l'Amérique. Il y a donc quatre points autour du pôle boréal où la déclinaison est nulle; le premier sur la côte ouest de la baie d'Hudson, le second sur la ligne qui joint Kasan à la mer Blanche, le troisième un peu à l'est d'Irkutsk, et le quatrième un peu à l'est de Jakutskoï. Entre le premier et le second, c'est-à-dire dans la partie nord-est de l'Amérique, sur l'océan Atlantique et dans toute l'Europe, la déclinaison est occidentale; entre le second et le troisième, c'est-à-dire dans la plus grande partie de la Sibérie, elle est orientale; entre le troi-

[1] Il y a quelque doute sur l'exactitude de cette observation, dont M. Hansteen a tiré des conséquences importantes.

sième et le quatrième, c'est-à-dire dans la Sibérie orientale, elle est occidentale; entre le quatrième et le premier, c'est-à-dire dans le Kamtschatka, dans la partie nord de l'océan Pacifique et dans la région nord-ouest de l'Amérique, elle redevient orientale.

La position attribuée par M. Hansteen à celui des pôles magnétiques qu'il admet exister dans l'Amérique septentrionale, s'accorde avec les observations faites par les capitaines Ross et Parry, car le capitaine Parry trouva le 22 août 1819 la déclinaison de 129° ouest sous une latitude de 70°, 40′ N. et une longitude de Greenwich de 91°, 47′ O.; et le 28 août il la trouva de 166° Est sous une latitude de 75°, 9′ N. et une longitude de 103°, 45′ O.; d'où il résulte que entre le 22 et le 28 août la déclinaison avait dû s'élever quelque part à 180° avant de devenir d'occidentale orientale, et que les observateurs avaient dû passer à quelques degrés au nord du principal pôle magnétique, ce qui assigne à ce pôle une position tout à fait semblable à celle que M. Hansteen lui attribue.

Les observations d'inclinaison de l'aiguille confirment ce résultat, car il est évident que l'aiguille d'inclinaison doit prendre une position verticale au-dessus du pôle, si le pôle est le point de convergence des forces qui dirigent l'aiguille. Or, dans le voyage scientifique qu'il a exécuté de 1829 à 1833, le capitaine Ross a trouvé que l'inclinaison était de 90° à un point dont la distance au pôle était de 19°, 55′ et la longitude de 96°, 45′, 18″ O. de Greenwich. Il résulterait seulement de la différence de longitude que le pôle magnétique aurait un mouvement de l'ouest à l'est, ce que du reste M. Hansteen avait déjà conclu des précédentes observations, soit pour ce pôle, soit pour le second pôle situé en Sibérie.

M. Hansteen a réussi au moyen des observations magnétiques faites dans l'hémisphère austral à y reconnaître aussi l'existence de deux pôles magnétiques, ayant un mouvement vers l'ouest au lieu de l'avoir vers l'est; l'un de ces pôles est situé au sud de la Nouvelle-Hollande et l'autre au sud de la Terre de Feu. En désignant par A le pôle magnétique de l'hémisphère austral situé au sud de la Nouvelle-Hollande, par *a* celui

du même hémisphère situé au sud de la Terre de Feu, par B le pôle magnétique de l'hémisphère boréal situé dans la partie nord-ouest de l'Amérique septentrionale, par *b* celui qui est dans la partie nord-est de la Sibérie, on trouve un rapprochement assez curieux, savoir que A et B sont à peu près diamétralement opposés l'un à l'autre, car chacun d'eux est éloigné du pôle d'environ 20°, et A est dans le méridien de 136° E., B dans celui de 260° E. de Greenwich, ce qui constitue entre eux une différence de 124° en longitude. Les points *a* et *b* ont aussi une situation relative semblable, quoique cependant présentant une analogie moins grande; la distance du premier au pôle austral est de 13°, celle du second au pôle boréal d'un peu plus de 40°; la longitude du premier est de 237° E. et celle du second de 116°, ce qui établit une différence de longitude entre eux de 121°.

Suivant M. Hansteen, la terre aurait deux axes magnétiques dont les extrémités formeraient les quatre pôles que nous venons de reconnaître; deux situés dans l'hémisphère boréal, se mouvant de l'ouest à l'est, et deux situés dans la région australe, se mouvant de l'est à l'ouest; mais il existerait une grande différence dans la promptitude de leur déplacement[1]. Au moyen de ces mouvements des pôles magnétiques, on expliquerait les variations de la déclinaison et de l'inclinaison, lesquelles proviendraient du rapprochement ou de l'éloignement des pôles dans chaque hémisphère, et par conséquent du changement pour un même lieu dans la prédominance de l'un sur l'autre. Ainsi, par exemple, la déclinaison devient occidentale dans notre hémisphère quand le pôle magnétique B de l'Amérique se rapproche de l'Europe en même temps que le pôle *b* de Sibérie s'en éloigne; auparavant elle était orientale, ce dernier pôle étant plus près de l'Europe. Ainsi l'inclinaison diminue en Europe par l'effet du déplacement à l'est du pôle de la Sibérie, tandis qu'elle augmente dans la Sibérie orientale et dans le Kamtschatka.

[1] M. Hansteen assigne à ces révolutions des pôles les durées suivantes : au pôle A, 4609 ans; au pôle *a*, 1304; au pôle B, 1740; au pôle *b*, 860.

Les variations de la déclinaison et de l'inclinaison dans l'hémisphère austral sont également justifiées par les mouvements attribués aux pôles magnétiques. Ainsi, au Cap de Bonne-Espérance et dans les baies qui l'avoisinent, la déclinaison était orientale au temps de Vasco de Gama [1]; ensuite elle est devenue occidentale et s'est élevée jusqu'à plus de 25°, ce qui tient à ce que le pôle américain *a* s'est éloigné, tandis que celui de la Nouvelle-Hollande A s'est rapproché. C'est aussi au mouvement vers l'ouest du pôle *a* qu'est due l'augmentation de l'inclinaison australe dans toute l'Amérique méridionale.

Après avoir établi par les phénomènes de déclinaison et d'inclinaison l'existence de quatre pôles magnétiques, ou plutôt de quatre centres de convergence des forces magnétiques du globe, M. Hansteen a cherché à montrer que les phénomènes d'intensité conduisent à la même conséquence. Déjà Humboldt, en 1799, avait trouvé que l'intensité magnétique était à son minimum à un point situé à 7° environ au sud de l'équateur au Pérou, et il avait pris pour unité cette intensité minimum; en 1805, Humboldt, par de nouvelles observations faites en Europe, conjointement avec Gay-Lussac, établit la loi que l'intensité magnétique allait en augmentant de l'équateur aux pôles. A ces documents et à d'autres encore, il faut joindre surtout les observations du colonel Sabine sur l'Atlantique, à partir de 12° latitude sud jusqu'à la côte la plus septentrionale du Spitzberg. Au moyen de toutes ces observations et des siennes propres qu'il a faites dans un voyage en Sibérie, M. Hansteen est parvenu à tracer des lignes *isodynamiques*, dont l'inspection montre que sur un même parallèle l'intensité est beaucoup plus grande en Amérique qu'en Europe, que les lignes isodynamiques sont en Amérique presque parallèles à l'équateur, tandis que sur l'Atlantique elles remontent au Nord, puis se rapprochent en Europe du parallé-

[1] Nous appelons dans l'hémisphère austral, comme dans l'hémisphère boréal, déclinaison orientale celle en vertu de laquelle le pôle nord de l'aiguille se dévie à l'est, et le pôle sud par conséquent à l'ouest ; en un mot, c'est le pôle nord, ou le pôle *marqué*, comme l'appellent les Anglais, qui est celui dont nous considérons toujours et dans tous les cas, les mouvements.

lisme à l'équateur. L'étude de ces lignes confirme l'existence des deux centres ou pôles magnétiques, avec cette différence seulement que le centre magnétique de la région ouest de l'Amérique septentrionale possède une intensité remarquablement plus considérable que celui de la région est de la Sibérie. Le petit nombre d'observations d'intensité dans l'hémisphère austral, que M. Hansteen avait à sa disposition, a suffi cependant pour lui permettre de reconnaître aussi deux maxima d'intensité aux mêmes places où la déclinaison et l'inclinaison avaient fait présumer l'existence de deux pôles magnétiques.

Il est évident que sur chaque méridien, il doit y avoir un point auquel l'intensité est à son minimum, point qui, en général, ne doit pas être loin de l'équateur, puisque l'intensité augmente également à mesure qu'on s'approche du Nord et à mesure qu'on s'approche du Sud; mais la place du minimum n'est point la même sur chaque méridien, et parmi les minima il y en a de plus petits les uns que les autres. Ainsi, sous le 300e méridien, l'intensité décroît depuis 1,8, sa valeur près de New-York (40° lat. N.), jusqu'à 1,0, sa valeur à 7° latitude sud au Pérou; puis elle augmente au sud de ce point jusqu'à 1,6, sa valeur à la Terre de Feu. Sous le 40e méridien, l'intensité décroît depuis la valeur 1,55 sur la côte la plus septentrionale du Spitzberg jusqu'à 20 ou 30° de latitude sud où elle n'est plus que 0,8, valeur qui paraît être celle du plus petit des *minima*, tandis que le minimum qu'on trouve sous le 280e méridien près de l'équateur, qui est un peu supérieur à 1,0, serait le plus grand [1].

Ainsi l'intensité a dans chaque hémisphère un double *maximum;* l'inclinaison a également un double *maximum* et un

[1] M. Hansteen avait cru, en se fondant sur l'intensité 1,8, observée par M. Sabine à New-York, par 41° latitude nord, et sur celle 1,6 (non corrigée) observée par M. de Rossel à Van-Diémen par 43° de latitude sud, que l'intensité magnétique devait être généralement plus considérable dans l'hémisphère boréal que dans l'austral. M. Duperrey, à la suite de ses observations, a fait remonter plus près de l'équateur la ligne d'intensité 1,6, qui passait par la terre de Van-Diémen, et l'a remplacée par la ligne 1,8, ce qui ne permet plus d'admettre la différence d'intensité signalée par M. Hansteen. Nous verrons même que, s'il y a une différence, elle est en faveur de l'hémisphère austral.

double *minimum* sur chaque parallèle géographique, et ces points se trouvent sur les mêmes méridiens que les points analogues pour l'intensité. Ainsi, par exemple, sur le 60e parallèle de latitude nord, l'inclinaison est d'environ 82° dans la baie d'Hudson, et de 72° entre Stockholm et Abo, de 75° sur le méridien d'Irkutsch, puis de 70° au Kamtschatka. De même sur la 50e parallèle de latitude sud, l'inclinaison est supérieure à 60° sur le 280e méridien; elle est d'environ 51° sur le 340e, et d'environ 75° dans la Nouvelle-Hollande. La direction de l'aiguille horizontale concorde également, comme nous l'avons vu avec l'inclinaison, et par conséquent avec l'intensité, dans la désignation des quatre pôles magnétiques.

On conçoit que dans la manière dont il nous présente le phénomène du magnétisme terrestre, M. Hansteen ne puisse pas reconnaître un *équateur magnétique* dans la ligne qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle; elle n'aurait cette qualité qu'autant qu'il n'existerait qu'un axe magnétique; mais comme ses observations le conduisent à reconnaître que la terre en a deux, ces axes ont chacun leur plan équatorial, et ces deux plans se coupent suivant une ligne droite aux extrémités de laquelle l'aiguille d'inclinaison doit être horizontale; en tout autre point la ligne sans inclinaison doit se trouver entre les deux plans équatoriaux, plus près de celui qui appartient à l'axe le plus énergique. La ligne, sans inclinaison, n'appartient donc pas à un plan, mais à une surface à double courbure dont les inflexions doivent changer à mesure que la situation relative de ces axes se modifie [1].

Halley avait déjà, avant M. Hansteen, montré l'impossibilité de concilier les différences de déclinaison observées dans l'hé-

[1] M. Hansteen a tracé sur la carte d'intensité la ligne sur laquelle l'inclinaison est nulle, soit d'après les observations de 1775 à 1780, soit d'après les plus récentes de 1822 à 1830. Ces deux lignes ne s'accordent en aucune façon; elles se coupent en quatre points dont la position indique un mouvement d'ondulation qui se reproduit dans les autres courbes d'inclinaison et qui est une conséquence nécessaire du déplacement des pôles. L'idée de quelques physiciens d'un simple mouvement de translation à l'ouest, d'un prétendu équateur magnétique unique, ne peut donc nullement expliquer les changements dans l'état magnétique du globe.

misphère austral avec deux pôles et la nécessité d'en admettre quatre pour donner une explication complète de tous les phénomènes de déclinaison observés sur tous les points du globe. Il avait même assigné la position de ces pôles qui a quelque analogie avec celle qui a été déterminée par M. Hansteen. Halley désignait par *pôles magnétiques* les points de la surface de la terre considérée comme un aimant, où la résultante des forces de toutes les parties du globe atteint un maximum [1].

Le colonel Sabine, auquel des travaux aussi nombreux que remarquables sur le magnétisme terrestre ont donné sur cette matière une autorité incontestée, admet aussi les quatre pôles comme conséquence des résultats de toutes les observations magnétiques faites sur les divers points de la surface du globe; mais il ne les définit pas comme Halley et comme M. Hansteen;

[1] Gauss, dans sa théorie du magnétisme terrestre, n'admet que deux pôles magnétiques; mais par ces mots pôles, il entend deux points où l'intensité magnétique, c'est-à-dire la composante horizontale de cette intensité, est nulle, et où il n'y a plus par conséquent que la composante verticale. Le premier est situé dans le nord de l'Amérique par 70° 35′ de latitude nord, et 264° 21′ de longitude est de Greenwich ; ce serait le pôle B de Hansteen à peu près ; le second au sud de la terre de Van-Diémen par 72° 35′ de latitude sud, et 152° 30′ de longitude ouest. Il y a en outre trois points où l'intensité magnétique totale est à son maximum relativement aux points voisins, dont deux sont situés dans l'hémisphère boréal et un dans l'austral. Le premier est à 16° au sud du pôle magnétique, par 54° 32′ de latitude nord et 261° 27′ de longitude est. Le second est situé à 71° 20′ de latitude nord, et 119° 57′ de longitude est en Sibérie, dans la région où Hansteen conjecturait qu'il y avait un second pôle. Le troisième est placé à 2° 26′ au nord, et 7° 56′ à l'est du pôle magnétique austral. L'intensité totale en ces trois points, en évaluant celle de Londres à 1,372, est respectivement de 1,7634 de 1,6918 et de 2,2605; tandis qu'aux deux pôles magnétiques nord et sud, elle est de 1,701 et de 2,253. Il y a deux points dans le voisinage de l'équateur où l'intensité magnétique est à son *minimum*. Ils sont situés, l'un dans l'Océan Pacifique, par 5° 7′ de latitude nord et 178,28 de longitude O.; l'autre près de l'île de Sainte-Hélène, par 18° 9′ de latitude sud et 350° 12′ de longitude E.; leurs intensités respectives sont de 0,9296 et de 0,8094. La ligne qui joint les points où l'inclinaison magnétique est nulle, coupe l'équateur presque diamétralement, par environ 8° et 188°; mais les deux points où elle s'éloigne le plus de l'équateur ne sont pas placés diamétralement, et sont situés, le premier par environ 14° 43′ de latitude nord et 52° de longitude, le second par 15° 4′ de latitude sud et 320° de longitude.

ce sont pour lui simplement les points de plus grande intensité magnétique pour deux systèmes qui se distinguent l'un de l'autre par la différence dans le degré de la variation séculaire à laquelle les phénomènes paraissent être sujets dans chacun d'eux.

La méthode par laquelle M. Hansteen a déterminé la position des pôles magnétiques n'est pas à l'abri de toute objection. M. Kupffer remarque avec raison que si l'on adopte deux pôles magnétiques dans chaque hémisphère, l'aiguille ne sera tournée ni vers l'un des pôles, ni vers l'autre, dans la plupart des points du globe, mais prendra une direction moyenne; il sera bien difficile alors de choisir entre les déclinaisons celles dont les points de convergence indiquent exactement la position du pôle magnétique. En supposant que ce fût un seul pôle qui agit en même temps sur l'aiguille, il serait impossible que la déclinaison, en s'avançant de l'ouest à l'est, fût d'abord occidentale, puis nulle, puis orientale, et cela sur des points très-rapprochés, comme on le trouve dans la Russie orientale européenne; ou même d'abord orientale, puis nulle, puis encore orientale, comme cela arrive près d'Irkoutsk. Du reste, M. Kupffer est peu disposé à admettre l'existence de pôles magnétiques proprement dits, c'est-à-dire de centres d'actions magnétiques rapprochés des pôles terrestres; il pencherait plutôt vers l'idée de Gauss que toute la masse de la terre est magnétique.

M. Barlow, qui a réuni les observations les plus importantes relatives à la déclinaison faites dans les voyages récents, en ayant soin d'écarter les erreurs provenant de l'attraction locale, n'admet pas non plus quatre pôles magnétiques dans chaque hémisphère; du reste, il s'est surtout occupé de tracer les lignes isogoniques, c'est-à-dire d'égale déclinaison, et les changements qu'elles éprouvent à la surface du globe. Il trouve dans l'Océan Indien une ligne sans déclinaison qui coupe l'équateur et dont la courbure est extraordinaire; les lignes d'égale déclinaison, situées à gauche de celle-ci, ont une déclinaison occidentale; celles qui sont à droite une déclinaison orientale. On reconnaît encore que dans ce même Océan, pendant 40 degrés, la ligne sans déclinaison marche presque parallèlement à l'équateur, et que pendant 40 autres degrés elle revient dans le méridien;

mais comme lorsqu'il n'y a pas de déclinaison, il faut que le pôle, c'est-à-dire le centre d'attraction, soit dans le méridien du lieu, il en résulte que ce pôle doit, pendant 40 degrés, coïncider avec le pôle terrestre, ce qui est peu compatible avec l'existence de quatre pôles.

Il paraîtrait que c'est vers l'année 1660 que la ligne sans déclinaison aurait traversé l'Océan Atlantique presque à angle droit avec le méridien de nos contrées, comme cela se voit aujourd'hui dans l'Océan Indien. Depuis ce temps elle a été graduellement en descendant vers le sud et vers l'ouest, et aujourd'hui elle traverse la partie orientale de l'Amérique du Sud; elle traverse également l'Australie, où depuis soixante ans elle ne paraît pas avoir éprouvé de modification.

En résumé, quelle que soit l'opinion qu'on se forme sur l'existence et le nombre des pôles magnétiques, il résulte des recherches de M. Hansteen qu'il existe deux lignes sans déclinaison [1], l'une située dans l'Océan Atlantique qui commence sous le 60e degré de latitude nord à l'ouest de la baie d'Hudson, s'avance dans la direction du sud-est à travers les lacs de l'Amérique du Nord, traverse les Antilles et le cap Saint-Roch jusqu'à ce qu'elle atteigne l'Océan Atlantique du Sud où elle coupe le méridien de Greenwich par 65° de latitude sud. Cette ligne est presque droite jusque près de la partie orientale de l'Amérique du Sud, où elle se courbe un peu au-dessus de l'équateur. La seconde ligne sans déclinaison, qui est remplie d'inflexions, commence au 60e degré de latitude sud, au-dessus de la Nouvelle-Hollande qu'elle traverse, s'étend dans l'archipel Indien en se partageant en deux branches qui coupent trois fois l'équateur. Elle passe d'abord au nord de ce dernier, à l'est de Bornéo; elle revient ensuite et passe au sud entre Sumatra et Bornéo, et traversant de nouveau l'équateur au-dessous de Ceylan d'où elle passe à l'est au milieu de la mer Jaune, elle se dirige ensuite le long de la côte de la Chine, puis redescend

[1] On a généralement admis qu'il existait sur le globe trois lignes sans déclinaison; mais il résulte des travaux de M. Hansteen que deux seulement sont bien déterminées, et que la troisième ne comprendrait qu'un très-petit nombre de points isolés.

de nouveau au nord en faisant un grand coude semi-circulaire, qui se termine à la mer Blanche. Du reste, la détermination des positions variables des lignes sans déclinaison n'a d'autre utilité que d'indiquer par leur changement celui de la direction des forces magnétiques sur l'ensemble de la surface du globe. Mais pour que cette détermination fût bien exacte, il faudrait connaître quels sont au même moment tous les points où l'aiguille de déclinaison est exactement dirigée dans le plan du méridien terrestre.

La conception des pôles magnétiques, commode pour fixer les idées sur la direction des forces du magnétisme terrestre, a cependant l'inconvénient de conduire à considérer ces pôles comme étant véritablement des centres d'où émanent les forces magnétiques, ce qui n'est point le cas; d'un autre côté, elle n'a pas l'avantage, à ce qu'il paraît, de satisfaire à toutes les exigences des observations. Aussi M. Duperrey a-t-il cherché à se représenter l'état magnétique des différents points du globe d'une manière indépendante de toute idée sur la position et le nombre des pôles magnétiques. Partant d'un point quelconque et cheminant toujours dans le sens de la direction de l'aiguille aimantée, d'abord vers le pôle nord, ensuite vers le pôle sud, et relevant tous les points par lesquels il a passé, il forme une courbe qui réunit tous ces points, et qui est pour lui un méridien magnétique. Prenant ensuite un autre point voisin du premier, il trace de la même manière un second méridien magnétique qui rencontre nécessairement le premier en deux points situés, l'un vers le pôle nord, l'autre vers le sud. En traçant sur le globe un certain nombre de ces méridiens et prenant les points d'intersection de deux méridiens voisins, on a dans chaque hémisphère une courbe fermée résultant de la réunion de tous ces points d'intersection, et on peut admettre, si l'on veut, que le pôle magnétique de chaque hémisphère se trouve au centre de l'aire renfermée par ces courbes. M. Duperrey a tracé sur les mêmes cartes, outre les méridiens magnétiques, des courbes normales aux méridiens, et qu'il a appelées *parallèles magnétiques*. Celle de ces courbes perpendiculaires qui passe par le milieu du méridien serait l'équateur magné-

tique, mais elle diffère de la courbe qui passe par tous les points de nulle inclinaison à laquelle on a en général réservé le nom d'équateur magnétique, et de celle qui passe par tous les points d'intensité minimum qui n'est point non plus la même exactement que celle d'inclinaison nulle, quoiqu'on lui ait aussi donné le nom d'équateur magnétique.

Les lignes d'égale inclinaison, soit isocliniques, seraient les vrais parallèles magnétiques analogues aux parallèles terrestres, si on considérait la ligne d'inclinaison nulle comme l'équateur magnétique. Mais elles ne sont point régulières et sont d'autant moins parallèles entre elles qu'elles se rapprochent davantage des régions polaires.

M. Duperrey estime que les lignes d'égale inclinaison ont, comme celle d'égale déclinaison, l'inconvénient de n'être pas l'expression d'un fait dépendant uniquement de l'action du magnétisme, car elles expriment deux faits à la fois, l'un qui dépend uniquement de l'action du magnétisme, l'autre de la direction particulière que suit chaque verticale. La ligne sans inclinaison ne peut donc pas, d'après cela, être considérée comme l'équateur magnétique; toutefois M. Duperrey, ayant cherché quelle serait la figure du véritable équateur magnétique, c'est-à-dire d'une courbe qui ne dépendrait d'aucune cause étrangère au magnétisme, et par conséquent dont la condition serait d'être perpendiculaire à tous les méridiens magnétiques et dont la moyenne des latitudes nord et sud serait zéro, ce qui est à peu près la moyenne des latitudes de la ligne sans inclinaison, il a trouvé que cette courbe ne diffère pas beaucoup de la ligne sans inclinaison. Le plan moyen de cette nouvelle courbe fait avec le plan de l'équateur terrestre un angle de 10°54′, et son axe, qui semble exprimer la direction suivant laquelle le globe est aimanté, perce la surface de la terre en deux points situés dans les régions polaires, l'un à 79°6′ latitude nord et 71°31′ longitude ouest, l'autre à 79°6′ latitude sud et 108°28′ longitude est. Or le plan moyen de la véritable ligne sans inclinaison, telle que l'a tracée M. Duperrey au moyen de deux cent soixante-dix observations qu'il a recueillies, fait un angle de 10°49′ avec l'équateur terrestre et

perce la surface du globe en deux points situés, l'un à 79°11′ latitude nord et 78°10′ longitude ouest, et l'autre à 79°11′ latitude sud et 101°40′ longitude est; la différence n'est donc pas bien grande entre ces deux plans[1]. Il faut remarquer cependant que les extrémités de l'axe de l'équateur magnétique, tel qu'il résulte de la ligne sans inclinaison, aussi bien que de la ligne perpendiculaire aux méridiens magnétiques, ne coïncident point avec les points de la surface du globe où l'aiguille affecte la direction de la verticale, et qu'on nomme pour cette raison pôles magnétiques. En effet, M. Duperrey ayant pu, dans sa recherche des méridiens magnétiques, déterminer exactement la position de ces points, a trouvé que l'un était situé à 70°10′ latitude nord et 100°40′ longitude ouest[2], et l'autre à 75° latitude sud et 136° longitude est. Il remarque avec raison que la non coïncidence des pôles avec les extrémités de l'axe de l'équateur magnétique, n'est point une raison pour repousser l'idée que le magnétisme terrestre provienne de deux centres d'action, pourvu que ces centres soient voisins du centre de la terre, car il suffit que ces deux centres soient sur une corde voisine parallèle à l'axe de l'équateur magnétique, pour que les pôles magnétiques de la surface soient aux extrémités d'une seconde corde à peu près parallèle, mais située au-delà de celle-ci par rapport au centre du globe.

Nous avons déjà vu qu'une des circonstances qui compliquent l'étude de la distribution du magnétisme sur le globe

[1] Il résulte du travail de M. Duperrey que la ligne sans inclinaison (équateur magnétique) ne rencontre la ligne équinoxiale que dans deux points, lesquels sont presque diamétralement opposés, et situés, l'un dans l'Océan Atlantique, l'autre dans le Grand Océan, à peu près dans le plan du méridien de Paris; que là où cet équateur ne rencontre que quelques îles éparses, il ne s'éloigne que bien peu de la ligne équinoxiale, qu'il s'en éloigne davantage lorsque les îles se multiplient, et ne parvient à son maximum d'excursion, soit au nord, soit au sud, que dans les deux grands continents qu'il traverse, qu'enfin il existe entre les sections australe et boréale de cette courbe singulière, une symétrie remarquable, beaucoup plus parfaite qu'on ne l'avait d'abord supposée.

[2] Cette détermination est très-rapprochée de celle qu'a obtenue directement le capitaine Ross, et qui est de 70° 5′ 17″ latitude nord, et 96° 45′ 18″ longitude ouest.

terrestre, c'est le défaut de parallélisme entre les lignes d'égale inclinaison et celles d'égale intensité[1], défaut constant et qui ne provient point d'irrégularités accidentelles. Ce point résultait déjà des observations de M. de Humboldt; il résulte également des recherches de M. Hansteen, comme nous l'avons remarqué. M. Duperrey, qui a complété le travail de M. Hansteen sur les lignes isodynamiques en ce qui concerne l'hémisphère austral, a obtenu à cet égard des résultats dont l'exactitude se trouve parfaitement confirmée par les observations toutes récentes du capitaine Fitz-Roy. Un principe assez important que M. Duperrey a mis en évidence, c'est que ces lignes isodynamiques coupent à angles droits les directions de l'aiguille de déclinaison, soit les méridiens magnétiques; ce sont donc ces lignes qui seraient les véritables parallèles magnétiques. L'équateur magnétique serait alors par conséquent la ligne passant par les points de tous les méridiens dont l'intensité est la plus petite; ce qui ne signifie point que cette intensité minimum y soit partout la même, car elle varie de l'unité à 0,867; aussi les lignes isodynamiques voisines de l'équateur magnétique viennent s'y terminer obliquement sans passer outre. Au fond, quoique la ligne des plus petites intensités magnétiques ne soit pas la même que la ligne sans inclinaison, ces deux courbes ne sont pas très-éloignées l'une de l'autre, suivant l'opinion de M. Duperrey, comme nous l'avons vu plus haut, quand nous avons montré qu'il n'y a pas une grande différence entre l'équateur magnétique tel que M. Duperrey le définit et l'équateur magnétique déterminé, soit par la ligne sans inclinaison, soit par la ligne des intensités minima. Nous avons déjà fait remarquer que M. Duperrey diffère de M. Hansteen, non-seulement en ce qu'il ne croit pas nécessaire d'admettre quatre pôles magnétiques, mais en ce qu'il trouve que l'intensité magnétique moyenne de l'hémisphère austral est supérieure à celle du boréal, la première étant 1,0152 si la seconde est représentée par l'unité.

La question de l'intensité magnétique est au fond celle dont

[1] Il existe néanmoins, comme nous l'avons établi dans § 1er, une relation intime entre l'inclinaison et l'intensité (Voyez plus haut, p. 214).

l'étude peut jeter le plus de jour sur le magnétisme terrestre; en effet des trois espèces de lignes magnétiques, lignes d'égale déclinaison, lignes d'égale inclinaison et lignes d'égale intensité, les dernières sont les plus importantes, car elles expriment l'égalité des résultantes magnétiques en tous les points de la surface de la terre par où elles passent, et indépendamment de toute autre considération étrangère au magnétisme; ce qui n'a pas lieu avec les deux autres espèces de lignes. Mais il faut reconnaître que l'exacte détermination des intensités présente de grandes difficultés quand il s'agit de comparer celle d'un lieu avec celle d'un autre, et il en résulte quelquefois des divergences parmi les observations qui obligent de laisser certaines questions en suspens. Ainsi d'après M. Fitz-Roy l'intensité magnétique serait un peu plus faible à l'île de Sainte-Hélène qu'à l'île de l'Ascension où passe la ligne sans inclinaison, tandis que le fait contraire résulte positivement des observations de M. de Tessan. Cependant la science possède un très-grand nombre de déterminations d'intensité dignes de toute confiance, et nous en avons déjà indiqué plusieurs en parlant des lignes isodynamiques de M. Hansteen; sans les rappeler, bornons-nous à remarquer que le rapport qui existe entre la plus faible et la plus forte intensité est supérieure au rapport de 1 à 2; en effet les intensités observées à New-York et à Hobart-Town, comparées à celles de Sainte-Hélène, sont comme 1,81 est à 0,84 ou comme 2,16 est à 1; il est même probable que ce rapport peut s'élever à celui de 2,5 à 1.

Il résulte, ainsi que nous l'avons vu, des recherches nombreuses sur l'intensité magnétique faites par Humboldt, puis par Humboldt et Gay-Lussac et après eux par MM. Hansteen, Sabine, Ermann, Quetelet, Forbes et bien d'autres, que l'intensité va en augmentant à mesure que, s'éloignant des régions équatoriales, on s'approche des régions polaires. Voici même la loi des variations qu'on peut tirer du tableau des observations depuis l'équateur magnétique jusqu'au pôle magnétique boréal.

Inclinaisons.	Intensités
0°	1.0
24°	1.1

Inclinaisons.	Intensités.
45°	1.2
64°	1.3
73°	1.4
76° ½	1.5
81°	1.6
86°	1.7

L'influence de la hauteur sur l'inclinaison et l'intensité magnétiques serait intéressante à connaître. Malheureusement les observations propres à résoudre cette question font défaut. On avait bien conclu de l'observation faite par MM. Biot et Gay-Lussac dans leur voyage aérostatique que le décroissement de la force magnétique à la hauteur à laquelle ils étaient parvenus, n'était pas sensible. Mais on n'avait pas fait attention que la différence de température étant de 40° entre la surface du sol et la région aérienne où Gay-Lussac fit osciller son aiguille, cette aiguille avait acquis un magnétisme plus fort par l'effet de l'abaissement de température, ce qui fait qu'elle aurait dû osciller plus vite si le magnétisme terrestre avait agi sur elle avec autant d'intensité que près du sol. Cette vitesse étant demeurée la même, il faut en conclure que la force magnétique du globe a diminué avec la hauteur. Cette diminution de la force magnétique avec la hauteur résulte également des observations faites en 1829 au sommet du mont Elbrouz (dans le Caucase) par M. Kupffer. Il est probable aussi que c'est à la diminution d'intensité qu'on doit attribuer la diminution d'inclinaison que j'ai eu l'occasion d'observer à l'Hospice du grand Saint-Bernard en 1829, avec M. le professeur Gautier, au moyen d'une excellente boussole d'inclinaison de Gambey. J'avais trouvé à Genève le 15 juillet que l'inclinaison était de 65°, 42′, 8; au grand Saint-Bernard, d'après des observations faites le 20 et le 21 juillet, elle était de 65°, 9′, 8, ce qui fait une différence de 0°, 33′ entre Genève et le Saint-Bernard; retranchant pour la différence de 22′ de latitude, 0°, 16′, 8, ainsi que l'observation directe indique qu'il faut le faire, il reste une différence de 16′, 2 due uniquement à la différence de hauteur. Déjà Schukburgh avait trouvé une différence de 20′ entre l'incli-

naison à Genève et l'inclinaison au sommet du Mole. On ne peut attribuer dans ces deux cas les différences à une attraction exercée par la masse de la montagne quand l'observation se fait au bas, puisque la station inférieure (Genève) était suffisamment éloignée du voisinage des montagnes pour qu'on pût y regarder leur action sur l'aiguille comme insensible. Il n'y a pas de doute cependant que les différents éléments magnétiques, et en particulier l'intensité, ne soient influencés dans bien des cas par des circonstances locales; c'est ce qui résulte au reste d'une manière évidente des recherches, soit de M. Forbes, soit de M. Bravais sur le décroissement de l'intensité horizontale avec la hauteur. M. Forbes a déduit d'une longue série d'observations qu'il a faites dans les Alpes et dans les Pyrénées un coefficient de diminution égale à 0,000034 pour cent pieds anglais, mais M. Bravais estime que ce coefficient est trop fort pour les Alpes; d'après ses propres observations, le décroissement avec la hauteur dans les stations qui entourent le Mont-Blanc ne serait au plus que 0,001 par kilomètre, ce qui ne ferait que 0,0000033 par cent pieds, coefficient dix fois moindre que celui de M. Forbes. M. Bravais croit qu'en ce qui concerne les Pyrénées les résultats de M. Forbes sont beaucoup plus favorables à l'opinion d'un décroissement de l'intensité horizontale. M. Forbes avait trouvé en effet pour les Pyrénées une diminution de 0,000053 pour cent pieds anglais, qui correspond à 0,000054 pour un kilomètre; et en tout cas le décroissement serait beaucoup plus rapide dans les Pyrénées que dans les Alpes.

L'analyse que nous venons de faire de la distribution des forces magnétiques sur la surface du globe, nous montre que cette distribution, quoique présentant bien des irrégularités locales, est soumise cependant à des lois générales qui se reconnaissent toujours; c'est ce que nous ferons ressortir, plus loin, d'une manière plus explicite que nous ne l'avons encore fait; mais nous devons auparavant nous arrêter sur un point essentiel, que nous avons déjà signalé, et qui est destiné à jeter un grand jour sur l'origine du magnétisme terrestre, savoir la variation qu'éprouvent constamment chacun de ses éléments.

Nous avons déjà parlé des variations séculaires, mais il existe en outre des variations annuelles et des variations diurnes. La variation diurne consiste dans le changement continuel de direction et l'intensité qu'éprouvent pendant les vingt-quatre heures qui constituent un jour, la force du magnétisme terrestre en un lieu déterminé; aussi se manifeste-t-elle sous la forme de variations diurnes de déclinaison, de variation diurne d'inclinaison et de variation diurne d'intensité. Si, ne nous occupant que de la première de ces variations, nous prenons la moyenne entre les positions extrêmes qu'affecte l'aiguille dans les vingt-quatre heures par rapport au méridien terrestre du lieu d'observation, ou, ce qui revient au même, entre son maximum et son minimum de déclinaison dans un même jour, différence qui constitue l'amplitude de la variation, nous obtenons la déclinaison absolue moyenne du jour [1]. La variation annuelle se déduit de la comparaison de ces déclinaisons moyennes du jour; dans ce but on les groupe par mois, et on prend la différence qui existe entre les moyennes mensuelles *maxima* et *minima*, en ayant soin de tenir compte de la variation séculaire qui influe d'une manière différente sur les mois du commencement et sur ceux de la fin de l'année.

Enfin la variation séculaire elle-même s'obtient en prenant la moyenne des déclinaisons moyennes diurnes ou mensuelles de l'année, et en la retranchant de celle de l'année précédente ou suivante, selon que l'aiguille tend à se rapprocher ou à s'éloigner du méridien terrestre. Il faut avoir soin de ne point confondre la variation mensuelle avec l'amplitude moyenne de la variation diurne de chaque mois. Ainsi, si je prends pour chaque mois de l'année la moyenne de l'amplitude de la déclinaison qui a lieu chaque jour à une même heure, je puis trouver de grandes différences à cet égard entre les différents mois, différences qui, par contre, peuvent devenir très-faibles

[1] Ce mode de détermination n'est point à l'abri de toute objection. M. Aimé montre, par une suite d'observations, que le résultat auquel il conduit peut différer beaucoup de celui qu'on obtient en prenant la moyenne des observations faites toutes les heures pendant vingt-quatre heures.

ou nulles, si je prends la moyenne des déclinaisons moyennes de tous les jours du mois. En effet, le premier résultat dépend de la grandeur de l'amplitude de la variation de la déclinaison dans un même jour, tandis que le second ne dépend que du changement que l'aiguille peut éprouver dans sa direction moyenne absolue d'un jour à l'autre, ou mieux d'un mois à l'autre, changement qui peut être nul ou très-faible, lors même qu'il y a eu de très-grandes différences dans l'amplitude de la variation diurne entre un jour et le suivant.

Ce que nous venons de dire de la déclinaison s'applique également aux variations diurnes, annuelles et séculaires des deux autres éléments, l'inclinaison et l'intensité; mais, comme nous le verrons, les variations, surtout en ce qui concerne l'intensité, sont beaucoup moins sensibles et par conséquent bien plus difficiles à apprécier.

La découverte des variations diurnes de l'aiguille aimantée remonte à l'année 1722; elle a été faite par Graham; mais ce n'est que depuis le commencement de ce siècle, surtout depuis trente à quarante ans, que ces variations ont été observées dans plusieurs endroits avec assez de soin pour qu'on ait pu y découvrir quelque loi. Si on ne considère la variation diurne que d'une manière générale, voici en quoi on peut dire qu'elle consiste :

Dans l'hémisphère nord, le pôle nord de l'aiguille de déclinaison marche de l'est à l'ouest depuis 8 h. $\frac{1}{4}$ du matin jusqu'à 1 h. $\frac{1}{4}$ après midi; de l'ouest à l'est depuis 1 h. $\frac{1}{4}$ après midi jusqu'au soir.

Dans l'hémisphère sud, le pôle sud de l'aiguille de déclinaison marche de l'est à l'ouest depuis 8 h. $\frac{1}{4}$ du matin jusqu'à 1 h. $\frac{1}{4}$ après midi, et de l'ouest à l'est depuis 1 h. $\frac{1}{4}$ après midi jusqu'au soir.

On voit, d'après cela, que les mouvements de l'aiguille dans un des hémisphères sont opposés à ce qu'ils sont dans l'autre; de sorte que si un observateur partant de Paris s'avance vers l'équateur, la pointe nord de son aiguille, tant qu'il sera dans notre hémisphère, effectuera tous les matins un mouvement vers l'occident, tandis que dès qu'il aura passé dans l'autre,

cette même pointe éprouvera tous les matins un mouvement vers l'orient. Or il semble impossible que ce changement du mouvement occidental en mouvement oriental se fasse d'une manière brusque. On a donc cru qu'il devait y avoir nécessairement entre la zone où s'observe le premier de ces mouvements, et celle où s'opère le second, une ligne où le matin le pôle nord de l'aiguille ne marcherait ni à l'orient ni à l'occident et resterait par conséquent stationnaire. Cette ligne est-elle l'équateur terrestre, l'équateur magnétique? C'est ce qu'on ignore encore. On a bien trouvé que l'amplitude des variations diurnes était beaucoup moindre dans les lieux voisins de ces lignes, mais on n'a pas encore trouvé de points où elle fût complétement nulle; il est probable, comme nous le verrons, qu'il n'en existe pas.

Revenant aux variations diurnes dans l'hémisphère nord, si nous les suivons de plus près, nous trouvons, comme cela résulte d'un très-grand nombre d'observations et en particulier de celles de M. Arago, que l'aiguille, pour revenir de son excursion orientale vers l'occident, s'y prend à deux fois dans les vingt-quatre heures, qu'elle fait ainsi deux oscillations complètes et éprouve par conséquent deux déclinaisons *maxima* et deux *maxima* de la manière suivante :

1° A partir de 11 heures du soir, le pôle nord de l'aiguille marche de l'occident à l'orient, atteint une déclinaison *maximum* à 8 h. $\frac{1}{4}$ du matin, et rétrograde ensuite vers l'occident pour atteindre sa déclinaison *maximum* à 1 h. $\frac{1}{4}$.

2° A partir de 1 h. $\frac{1}{4}$, l'aiguille marche de nouveau vers l'orient, atteint un second *minimum* entre 8 et 9 h. du soir et revient ensuite vers l'occident pour un second *maximum* à 11 h. du soir. L'amplitude la plus grande est celle de la demi-oscillation qui s'exécute de 8 h. du matin à 1 h. de l'après-midi; c'est pourquoi nous l'avions indiquée comme constituant d'une manière générale la variation diurne.

L'amplitude des variations diurnes n'est point la même dans les divers lieux; elle n'est point non plus la même aux différentes époques de l'année dans le même lieu. Ainsi, au moyen d'observations faites pendant quinze années, de 1820 à 1834,

Arago a trouvé que l'amplitude de la variation diurne était en moyenne de 13 à 11 minutes pendant les mois de mars, d'avril, de mai, de juin, de juillet, d'août, de septembre et d'octobre[1], et de 8 à 6 pendant les mois de novembre, de décembre, de janvier et de février; que le maximum moyen de la variation diurne a lieu en avril et le maximum moyen en décembre, et que la variation diurne moyenne est comprise entre 3 et 17 minutes qui sont les deux valeurs extrêmes, la première en décembre, la seconde en juin.

L'inclinaison a aussi une variation diurne, mais cette variation plus faible que celle de la déclinaison ne va pas en général au delà de 3 à 4 degrés. D'après les observations de M. Arago, il y aurait un maximum d'inclinaison entre 8 et 9 heures du matin, un minimum après 2 et 3 heures après midi, un second maximum entre 8 et 9 heures du soir, et un minimum entre 11 heures du soir et minuit. Les plus grandes amplitudes des variations diurnes semblent avoir lieu après les équinoxes.

L'intensité éprouve aussi des variations diurnes indépendantes de celles de l'inclinaison, ainsi que cela résulte de nombreuses observations de M. Arago faites et calculées avec beaucoup de soin. M. Hansteen, qui avait aussi observé des variations diurnes d'intensité, estime qu'elles ne sont qu'apparentes si on a soin de tenir compte de la variation de l'inclinaison.

Cependant on a généralement reconnu qu'il existe une variation diurne, non-seulement pour l'intensité horizontale, celle qui dépend à la fois de la variation de l'inclinaison et de celle de l'intensité absolue, mais aussi pour cette dernière intensité qu'on désigne sous le nom d'*intensité totale*.

Indépendamment des variations diurnes, M. Arago a constaté, en prenant les déclinaisons moyennes mensuelles, deux *maxima* vers mars et septembre, c'est-à-dire vers les équinoxes, et deux *minima* vers juin et décembre, c'est-à-dire vers les

[1] Les mois de mars et d'octobre sont ceux de ces mois où l'amplitude moyenne de la variation est la moindre (11′ 22 et 11′ 0); le mois d'avril est celui où elle est la plus forte (13′ 20″).

solstices; ce résultat est d'accord avec celui qu'avait obtenu Cassini qui le premier avait remarqué une variation annuelle; mais d'après ce savant cette variation consistait seulement en ce que la déclinaison diminue depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été, et que, à partir de cette époque jusqu'à l'équinoxe du printemps, c'est-à-dire pendant les neuf autres mois, la déclinaison moyenne mensuelle augmente, l'aiguille reprenant son chemin vers l'ouest. M. Arago avait trouvé que des observations faites par Gilpin constataient l'existence à Londres en 1800 d'une oscillation périodique semblable à celle découverte à Paris en 1786 par Cassini.

Au milieu de toutes les observations sur les variations diurnes des trois éléments magnétiques et dont les résultats sont généralement d'accord[1], nous transcrivons le tableau suivant qui renferme le résumé d'observations de trois années (1843, 1844 et 1845) faites avec le plus grand soin par M. Lamont à Munich. Nous y trouvons réunies les variations diurnes des trois éléments; les variations de la déclinaison et de l'inclinaison sont exprimées en minutes; celles des intensités horizontale et totale en dix millièmes de la valeur entière. Comme les variations présentent des caractères essentiellement différents selon que la déclinaison du soleil est boréale ou australe, M. Lamont divise l'année en deux moitiés, et distingue les variations de l'hiver et les variations de l'été.

[1] Il existe cependant une exception remarquable à la loi générale des variations diurnes, c'est celle qui a été observée par M. Gay à Valdivia, au Chili, sur la côte occidentale de l'Amérique du Sud. Au lieu de deux mouvements de va et vient dans les vingt-quatre heures, M. Gay en a constamment observé trois : un le matin à l'est, un second au milieu de la journée à l'ouest, et le troisième le soir encore à l'est; les heures des *maxima* et des *minima* diffèrent un peu suivant les saisons; mais le triple mouvement a toujours lieu de sorte qu'on peut regarder le phénomène comme constant. L'amplitude des variations change beaucoup d'un jour à l'autre; cependant, d'après un grand nombre d'observations, on peut l'évaluer à 6′ 5″, 2, moyenne de six mois; en été, cette moyenne serait de 7′ 1″, 9, et en automne de 5′ 8″, 4.

HEURES.	DÉCLINAISON.		INTENSITÉ HORIZONTALE.		INCLINAISON.		INTENSITÉ TOTALE.	
	ÉTÉ.	HIVER.	ÉTÉ.	HIVER.	ÉTÉ.	HIVER.	ÉTÉ.	HIVER.
1 h. mat.	2,22	0,76	13,65	5,04	0,08	0,29	8,03	2,57
2 —	2,05	0,98	12,98	4,58	0,16	0,36	7,73	2,43
4 —	1,80	1,49	12,02	5,93	0,23	0,14	7,21	3,15
6 —	0,52	1,47	9,99	6,77	0,50	0,00	6,08	3,59
7 —	0,00	1,37	7,27	6,70	0,97	0,01	4,51	3,58
8 —	0,05	0,97	3,23	5,14	1,56	0,25	2,26	2,70
9 —	1,33	1,19	0,29	2,56	1,92	0,60	0,33	1,26
10 —	3,73	2,39	0,00	0,46	1,97	0,92	0,00	0,04
11 —	6,47	3,98	1,87	0,00	1,66	1,07	1,17	0,00
Midi	8,70	5,28	5,47	1,80	1,23	0,92	3,47	1,24
1 h. soir.	9,58	5,56	8,61	3,34	0,92	0,78	5,30	2,45
2 —	9,04	4,84	10,58	3,27	0,79	0,85	7,15	2,60
3 —	7,67	3,47	11,83	2,81	0,72	0,94	8,16	2,40
4 —	5,85	2,48	11,69	2,18	0,79	1,02	8,19	2,11
5 —	4,38	2,06	11,90	2,11	0,72	0,99	8,38	1,90
6 —	3,41	1,45	12,75	3,18	0,56	0,81	8,66	2,55
8 —	2,56	0,60	15,24	4,43	0,10	0,57	9,73	3,11
10 —	2,23	0,00	15,16	5,29	0,00	0,34	9,33	3,13
Minuit.	2,14	0,44	14,15	5,40	1,10	0,27	8,65	2,84

Chacun des éléments magnétiques a deux *maxima* et deux *minima* de variations dans 24 heures :

	Maxima.		Minima.	
Déclinaison.	5 h. matin*	1 h. soir	8 h. matin	10 h. soir*
Inclinaison.	10 h. matin	4 h. soir*	7 h. matin*	11 h. soir
Intensité hor.	6 h. matin*	11 h. soir	10 h. matin	5 h. soir*
Intensité totale.	7 h. matin*	10 h. soir	2 h. matin*	10 h. soir*

Les maxima et les minima affectés d'un astérisque sont moins marqués en été.

Les observations de M. Lamont l'ont amené à reconnaître une variation séculaire de la déclinaison très-régulière, savoir :

1841-1842	—	6'48
1842-1843	—	6'72
1843-1844	—	6'85
1844-1845	—	6'70

La variation séculaire de l'intensité horizontale est beaucoup

moins régulière, ainsi que M. Hansteen l'a déjà remarqué. Les observations de M. Lamont donnent pour cette variation :

1842-1843	—	0,0038
1843-1844	—	0,0021
1844-1845	—	0,0014

Nous avons déjà vu que la variation séculaire de l'inclinaison n'est pas très-régulière, et qu'après avoir été de 5′ de 1778 à 1810, elle n'est que 3′ 5 environ de 1820 jusqu'à ce jour.

Une remarque importante de M. Lamont est que, si on tient compte de la variation séculaire et qu'on ramène les observations à ce qu'elles seraient si elles étaient faites à la même époque, on ne trouve pas que la variation *annuelle* des éléments magnétiques soit bien sensible. On a en effet :

	Déclinaison.	Intensité.
Janvier, février, mars.	16° 40′88	1,9348
Avril, mai, juin.	40′94	1,9351
Juillet, août, septembre.	40′81	1,9345
Octobre, novembre, décembre.	40′73	1,9348

Au reste, en ce qui concerne la variation annuelle, nous devons remarquer que déjà il y a une différence fondamentale entre les résultats d'Arago et ceux de Cassini, puisqu'Arago reconnaît deux *maxima* dans l'année et qu'il n'y a qu'un *maximum* suivant Cassini, et que de plus, les *maxima* et les *minima* d'Arago sont très-peu prononcés. Ne serait-il point possible que cette variation annuelle eût diminué et presque disparu depuis que la variation séculaire a elle-même diminué d'amplitude? Il en serait de même pour l'inclinaison à laquelle Arago avait trouvé une variation annuelle indépendamment de la variation séculaire, et qui consistait en ce qu'elle avait un *minimum* en avril et un *maximum* en août.

L'amplitude de la variation diurne paraîtrait, d'après les observations de M. Lamont, être variable dans un même lieu suivant les années. Ainsi la différence entre les déclinaisons à 8 heures du matin et à 1 heure après midi serait pour 1834-1835 de 8′25, et irait en croissant jusqu'en 1836-1837 où elle serait de 12′90, à partir de quoi elle irait graduellement en

diminuant jusqu'en 1844-1845 où elle ne serait plus que de 7'41.

M. Lamont a confirmé cette variation régulière dans l'amplitude des variations par des observations diurnes suivies jusqu'en 1855, et il a été conduit à reconnaître que la grandeur des variations de la déclinaison a une période décennale, de telle sorte qu'elle augmente régulièrement pendant cinq ans et décroît de même pendant cinq autres années. Il trouve que l'époque de la plus faible déclinaison est 1843-1844 et celle de la plus grande 1848-1849. Outre le maximum déjà signalé de 1836-1837, il en trouve un autre en 1817 au moyen des observations du colonel Beaufoy, et même un autre en 1786-1787 au moyen de celles de Cassini. La même période décennale se remarque dans les variations de l'intensité horizontale; ainsi en 1843 cette intensité a un minimum, puis un maximum en 1848, à partir duquel elle recommence à décroître jusqu'en 1853. Déjà en comparant les observations d'intensité, faites par M. Kreil à Milan, en 1837-1839, avec les siennes plus récentes, M. Lamont avait trouvé que la variation de cet élément, tout comme celui de la déclinaison, a diminué depuis l'époque mentionnée.

Indépendamment des variations régulières, les éléments magnétiques sont soumis à des variations irrégulières, soit perturbations, qui sont en général simultanées dans plusieurs lieux différents et paraissent soumises elles-mêmes à certaines lois générales. Pour étudier ces mouvements irréguliers, il faut soustraire de chaque observation la valeur moyenne mensuelle de la déclinaison, qui correspond à la même heure; ce qui reste est la déviation de l'aiguille de sa marche régulière. M. Lamont a dressé des tableaux qui présentent ces déviations pour plus de 20,000 observations. Leur inspection montre que les mouvements irréguliers de l'aiguille ont une période diurne régulière; on y voit que les heures du *maximum* et du *minimum* de ces périodes coïncident avec les heures des *maxima* et des *minima* secondaires de notre tableau des variations diurnes inséré plus haut. M. Lamont en déduit cette conséquence remarquable que la marche diurne telle que nous l'observons est due

à deux causes différentes; nous verrons plus loin que cette remarque de M. Lamont est d'accord avec une remarque semblable de M. Bravais et de M. Sabine, à l'occasion d'observations faites dans des lieux très-différents. M. Kreil, qui a fait une étude particulière des perturbations magnétiques, a cru y remarquer une espèce de périodicité annuelle; mais il faudrait un très-grand nombre d'années d'observations pour démontrer l'existence réelle d'une semblable périodicité. Nous reviendrons du reste sur les mouvements irréguliers de l'aiguille aimantée en nous occupant de l'aurore boréale avec l'apparition de laquelle ils sont intimement liés.

Nous n'avons étudié jusqu'à présent les variations magnétiques que dans un même lieu, en ne les envisageant que dans leurs rapports avec le temps. Mais les variations des forces magnétiques du globe ne dépendent pas uniquement du temps; elles dépendent aussi, comme ces forces elles-mêmes, du lieu d'observation. Cet élément de la question a une immense importance par le jour qu'il peut jeter sur la nature et l'origine des forces dont il s'agit; aussi a-t-on multiplié les observations magnétiques sur des points très-différents de la surface du globe, et a-t-on cherché à rendre, autant que possible, simultanées les observations faites dans ces diverses stations. Nous avons déjà signalé sous ce rapport les travaux de M. Sabine, et les observations qui se font sous sa direction dans quatre points du globe bien différents, soit les uns des autres, soit de Greenwich et autres lieux européens, avec des instructions parfaitement semblables dans tous ces observatoires. Ces quatre stations sont Toronto, Sainte-Hélène, le Cap de Bonne-Espérance et Hobart-Town. Notons aussi les observations simultanées qui se sont faites pendant longtemps avec des instruments parfaitement semblables dans un très-grand nombre d'observatoires, par Gauss et plusieurs savants qui s'associèrent et arrêtèrent qu'il y aurait par an six périodes d'observations d'une durée chacune de vingt-quatre heures, plus deux périodes supplémentaires pendant chacune desquelles les observations se feraient de cinq en cinq minutes. Enfin MM. Lottin et Bravais, dans les régions boréales, M. Aimé à Alger, ont également, par

leurs observations, éclairé le sujet de l'influence des localités sur les lois des variations des éléments magnétiques.

M. Sabine a établi une succession de comparaisons entre les diverses variations dans les quatre stations que nous avons indiquées [1]. Il a d'abord tracé les courbes qui indiquent la série des positions moyennes de l'aiguille de déclinaison dans les vingt-quatre heures, soit les variations moyennes diurnes de cette déclinaison, pour Toronto, Hobart-Town, Saint-Hélène et le Cap, les observations étant faites toutes les heures pendant cinq années. La courbe pour Toronto est exactement contraire, et en même temps symétrique, à quelques irrégularités près, à celle pour Hobart-Town. Ainsi, à Toronto, le pôle nord marche vers l'est de une heure après midi jusqu'à dix heures du soir; de dix heures du soir à deux heures du matin, il retourne vers l'ouest, puis il reprend son mouvement vers l'est jusqu'à huit heures du matin, moment de son maximum de déclinaison orientale; il se tourne alors d'une manière continue vers l'ouest jusqu'à une heure après midi, époque de son maximum de déclinaison occidentale. A Hobart-Town le pôle nord marche à l'ouest de deux heures après midi jusqu'à onze heures du soir; de onze heures du soir à trois heures du matin il retourne vers l'est; puis il reprend son mouvement vers l'ouest jusqu'à neuf heures du matin, moment de son maximum de déclinaison occidentale; il reprend alors un mouvement continu vers l'est jusqu'à deux heures après midi, moment de son maximum de déclinaison orientale. Il faut remarquer que la courbe est surtout prononcée depuis quatre à cinq heures du matin jusqu'à six ou sept heures du soir, dans les deux stations également, quoiqu'en sens inverse. Observons aussi que les mouvements à

[1] Nous croyons utile de donner ici la position géographique et les caractères magnétiques des quatre stations, auxquelles nous ajoutons celle de Greenwich :

	Latitude.	Long. Greenwich.	Décl. moy.	Inclin. moy.
Toronto	43°40 N.	77° 5′ O.	1°25′ O.	75°15′ N.
Hobart-Town	42°52′ S.	147°27′ E.	9°58′ E.	70°34′ S.
Sainte-Hélène	15°56′ S.	5°40′ O.	23°36′ O.	21°40′ S.
Cap de Bonne-Espérance	33°56′ S.	18°30′ E.	29° 5′ O.	53°15′ S.
Greenwich	51°31′ N.		22°51′18″ O (1847).	69° « N.

Toronto, tout en étant identiques, mais de signes contraires à ceux d'Hobart-Town, sont habituellement en avance d'une heure sur ces derniers.

La courbe de Sainte-Hélène et celle du Cap de Bonne-Espérance se ressemblent beaucoup; elles se partagent l'une et l'autre en deux branches, correspondantes à deux périodes, l'une de mai à septembre inclusivement, l'autre d'octobre à février inclusivement; les mois de mars et d'avril n'ayant pas de caractère bien déterminé. Dans la première période la variation dominante est l'orientale; dans la seconde c'est l'occidentale; si nous suivons la marche de l'aiguille à Sainte-Hélène dans la première période, nous trouvons qu'à partir de onze heures du soir le pôle nord de l'aiguille se dévie à l'est très-lentement jusqu'à quatre heures du matin, époque à partir de laquelle la déviation augmente rapidement jusqu'à sept heures du matin qu'elle atteint son maximum; à partir de ce moment l'aiguille rétrograde promptement vers l'ouest jusqu'à dix heures du matin, puis elle n'éprouve que quelques légères oscillations jusqu'à onze heures du soir. C'est entre cinq et six heures du soir qu'elle atteint son maximum de déclinaison occidentale qui est beaucoup moins prononcé que celui de déclinaison orientale. La marche de l'aiguille au Cap suit à peu près les mêmes phases; seulement elle recommence à rétrograder vers l'ouest entre onze heures et midi au lieu de dix heures; et c'est à ce moment qu'a lieu son maximum de déviation occidentale; puis elle oscille autour de sa position moyenne jusqu'à onze heures du soir; elle éprouve seulement un second maximum de déviation orientale entre trois et quatre heures après midi, mais peu prononcé. Dans la seconde période, c'est à dix heures du soir, dans les deux stations également, que l'aiguille commence son mouvement vers l'ouest, qui atteint son maximum à huit heures du matin, pour Sainte-Hélène, entre neuf et dix heures pour le Cap; à partir de ce moment l'aiguille se porte rapidement vers l'est, et elle atteint son maximum de déviation orientale à midi pour Sainte-Hélène, et entre une et deux heures après midi pour le Cap; elle rétrograde alors vers l'ouest jusqu'à cinq heures et six à sept heures du soir, époques à partir

desquelles elle n'éprouve plus de mouvement bien sensible jusqu'à dix heures du soir.

On voit par ces résultats que Sainte-Hélène participe pendant une moitié de l'année, quant à la marche de la variation diurne de l'aiguille, aux caractères des stations de l'hémisphère nord, et pendant l'autre moitié aux caractères des stations de l'hémisphère sud. Les mouvements opposés qui ont lieu simultanément chaque jour de l'année, sur le même méridien dans les deux hémisphères, ne se neutralisent point, comme on aurait pu le croire, de manière à laisser l'aiguille stationnaire, mais au contraire la variation diurne à Sainte-Hélène possède à la fois le caractère de celle qui a lieu dans les deux hémisphères; seulement, pendant une moitié de l'année, c'est le caractère de la variation de l'hémisphère nord, pendant l'autre moitié, c'est le caractère de la variation de l'hémisphère sud, qu'elle présente. Dans les mois intermédiaires de mars, d'avril, de septembre et d'octobre, la variation diurne participe plus ou moins, suivant le jour, aux caractères propres des deux saisons; cependant septembre peut être considéré comme appartenant à la période de mai à août, et octobre à la période de novembre à février, quoique l'un et l'autre présentent, entre cinq et sept heures du matin, quelques traces du caractère opposé à celui de leur période. Quant à mars et avril, tous les deux manifestent également, dans les heures du matin, une déclinaison d'abord orientale, puis occidentale, ce qui fait qu'on ne peut les comprendre ni dans l'une ni dans l'autre période, puisqu'ils ont les caractères de toutes les deux. Il est important de remarquer que les deux portions de l'année dans lesquelles la variation diurne a lieu dans des directions opposées à Sainte-Hélène, ne sont point déterminées par la déclinaison du soleil relativement à la latitude du lieu, mais bien par cette déclinaison relativement à l'équateur; car dans la première supposition, la déclinaison du soleil ne devenant australe pour Sainte-Hélène que dans la première semaine de novembre, et par conséquent redevenant déjà boréale dans la première semaine de février, les deux périodes devraient être respectivement de trois et de neuf mois au lieu d'être égales comme elles le sont. Elles ne sont donc point séparées l'une de

l'autre par le moment où le soleil, à son passage au méridien, se trouve au zénith de Sainte-Hélène, mais bien par celui où il est au zénith de la ligne équatoriale. Nous verrons dans le paragraphe suivant l'importance que présente cette remarque, dans l'explication des variations diurnes.

Quant au Cap de Bonne-Espérance dont la latitude est de 33° 56′, et pour lequel la déclinaison du soleil est par conséquent boréale toute l'année, il n'y a pas même possibilité à poser la question qui vient de nous occuper pour Sainte-Hélène. Il semblerait que cette station devrait obéir pour sa variation diurne magnétique aux lois qui régissent cette variation dans l'hémisphère austral; cependant elle participe à cet égard aux caractères des stations intertropicales, et, comme à Sainte-Hélène, les deux périodes sont séparées par le moment où le soleil passe à l'équateur, la déclinaison ayant lieu à l'est quand le soleil est dans l'hémisphère boréal, à l'ouest quand il est dans l'austral.

Cette anomalie que présente le Cap de Bonne-Espérance est d'autant plus frappante que, si l'on prend dans l'hémisphère boréal une station située à peu près à la même distance de l'équateur, telle qu'Alger dont la latitude est de 36°, on trouve, ainsi que cela résulte des observations de M. Aimé, que pendant toute l'année l'aiguille arrive à la limite de son excursion à l'est vers 2 heures après midi. Or, si les mouvements de l'aiguille étaient au Cap inverses de ceux d'Alger, la limite à l'ouest devrait y arriver en moyenne toute l'année vers 8 heures du matin, et la limite à l'est vers 1 ou 2 heures après midi; tandis que, comme à Sainte-Hélène, il y a analogie avec Alger dans les mouvements de l'aiguille pendant les mois compris entre l'équinoxe d'automne et celui du printemps, et opposition seulement pendant les mois compris entre l'équinoxe du printemps et celui d'automne. Il y a donc dans la situation spéciale du Cap de Bonne-Espérance une cause particulière, probablement son isolement au milieu des mers, qui le fait participer, en ce qui concerne les variations magnétiques, au caractère des stations intertropicales. Il y participe encore en ce que l'amplitude des variations diurnes, qui y est beaucoup moins consi-

dérable qu'elle ne l'est à Alger, à peu près moitié. Cependant c'est également au Cap, comme à Alger, quand le soleil a la moindre élévation au-dessus de l'horizon, en janvier pour Alger et en juillet pour le Cap, que les variations sont les plus faibles.

Il résulte donc des observations que nous venons de résumer et qui ont été faites avec le plus grand soin, qu'il n'existe pas, comme Arago l'avait cru, de ligne entre les deux hémisphères ou l'aiguille, pendant toute l'année, ne marche ni à l'orient, ni à l'occident, c'est-à-dire reste stationnaire n'éprouvant aucune variation diurne; mais il existe des stations où la variation diurne est pendant la moitié de l'année orientale, et pendant l'autre moitié occidentale. Il peut, il est vrai, exister une ligne où la variation moyenne annuelle de la déclinaison soit nulle, c'est celle qui comprend les points où la variation occidentale et la variation orientale sont égales en durée et en intensité. Sainte-Hélène est bien près d'être un de ces points ; cependant il paraît que sa courbe moyenne se comporte comme appartenant légèrement à l'hémisphère austral; la ligne où la moyenne des variations diurnes de l'année serait nulle, passerait donc au nord de Sainte-Hélène.

Quoiqu'en général la variation diurne augmente d'amplitude à mesure qu'il s'agit de lieux dont la latitude est plus élevée, cependant M. Bravais, en tenant compte des perturbations qui sont très-fréquentes dans les régions boréales, a trouvé par la comparaison des grandeurs de l'arc parcouru simultanément à Bossekop et à Gœttingue, entre 8 heures du matin et 1 heure après midi, c'est-à-dire pendant le moment de la journée où les perturbations irrégulières se font à peine sentir, que l'excursion occidentale de l'aiguille de Bossekop est moindre que celle de l'aiguille de Gœttingue, dans le rapport de 5 à 6 environ. Mais il n'en est plus de même pour les perturbations qui augmentent considérablement d'étendue à mesure qu'on s'approche du pôle où elles sont bien plus fréquentes. Aussi M. Bravais est-il conduit à attribuer les variations de l'aiguille à deux genres d'action d'une nature très-différente, qu'il nomme *onde* et qu'il désigne par les noms d'*onde polaire* et d'*onde équatoriale*. La première, d'une intensité

variable, décroît à mesure qu'on se rapproche de l'équateur et résulte évidemment de forces dont le foyer est situé à de hautes latitudes magnétiques; la seconde, constante, va au contraire en croissant des pôles vers l'équateur magnétique, et l'origine des forces qui l'engendrent est située dans les régions équatoriales. Nous aurons occasion de reparler de cette distinction dans le paragraphe suivant. Revenant pour le moment aux perturbations magnétiques elles-mêmes, nous devons remarquer que M. Sabine, au moyen des observations faites à Toronto et à Hobart-Town, leur a trouvé des caractères particuliers assez curieux : 1° l'irrégularité de leur marche, un grand nombre de jours s'écoulant sans qu'on puisse en découvrir de traces; 2° l'étendue considérable de la déviation de sa position normale à laquelle l'aiguille est exposée pendant leur durée ; 3° leur existence simultanée, ou à peu près, sur toutes les parties du globe. Au moyen de ces caractères, M. Sabine a pu constater que sur 22,376 observations horaires à Toronto, il y en a eu 1,650 troublées, c'est-à-dire où il y a eu des perturbations; ce qui établit le rapport de 1 à 13, 6 entre les unes et les autres. A Hobart-Town, sur 21,436 observations horaires, il y en a eu 1,479 troublées, ce qui donne le rapport de 1 à 14, 5. Ce qu'il y a de remarquable, c'est qu'à ces deux stations, situées dans des hémisphères différents et presque dans des points opposés du globe, le nombre total des observations troublées se répartit entre chaque année de la même manière, de telle façon qu'en prenant pour unité ce nombre en 1845, on trouve qu'il est :

	A Toronto.	A Hobart-Town.
En 1844	1,08	1,12
1843	0,84	0,83

A cet accord se joint le fait que les observations troublées ont eu lieu dans les trois années, pour la plupart, aux mêmes jours dans les deux stations. M. Sabine conclut, de même que M. Lamont et que M. Bravais, de tout le travail auquel il s'est livré sur ce sujet, que le phénomène de la variation diurne doit être considéré nécessairement comme consistant en *deux* variations pério-

diques superposées l'une à l'autre, ayant des lois extrêmement dissemblables et probablement des causes immédiates différentes, que de plus ces deux éléments constituants de la variation présentent des rapports très-différents l'un vis-à-vis de l'autre dans les diverses parties du globe, et que c'est seulement dans les régions plus rapprochées des pôles que se fait sentir l'influence sur la variation diurne, de celui des éléments auquel sont dues les perturbations.

Un point fort intéressant, qui a encore occupé M. Sabine, c'est la détermination comparative pour chacune des quatre stations, Toronto, Hobart-Town, le Cap de Bonne-Espérance et Sainte-Hélène, de l'amplitude de la variation mensuelle moyenne de la déclinaison, pour chacune des 24 heures d'un jour entier. Cette détermination résulte de cinq années d'observations à Toronto, et au Cap, et de trois à Hobart-Town et à Sainte-Hélène. Un tableau graphique indique, au moyen de lignes verticales plus ou moins longues, l'amplitude de la variation mensuelle pour chacune des 24 heures, et de petites marques désignent sur chacune de ces lignes la grandeur moyenne de la variation pour chaque mois. La déclinaison moyenne de toute l'année, c'est-à-dire de tous les mois et de toutes les heures, est marquée au moyen d'une ligne horizontale qui coupe toutes les lignes dans des points très-différents, car il y en a même parmi ces lignes qui sont les unes tout à fait au-dessus, les autres tout à fait au-dessous de l'horizontale. Une ligne ponctuée passe par le milieu de toutes les lignes verticales; c'est une ligne brisée qui montre la variation moyenne annuelle de la déclinaison à chacune des 24 heures du jour. Si l'on compare la déclinaison moyenne d'un certain mois à une certaine heure dans une certaine année, avec celle du même mois à la même heure dans une autre année, on trouve ces deux valeurs uniformes; ce qui montre que la déclinaison moyenne qu'on obtient en divisant la somme de toutes les déclinaisons par leur nombre a la même valeur, quelle que soit l'année que l'on considère. Il faut remarquer seulement que la déclinaison absolue change d'une année à l'autre à cause de la variation séculaire qu'on peut ainsi facilement déterminer, et qu'on

trouve comparativement faible à ces stations, sauf pour Sainte-Hélène où elle est considérable, puisqu'elle éprouve un accroissement annuel d'environ 8 minutes à l'ouest.

L'examen des tableaux graphiques, dressés comme nous venons de l'indiquer, montre d'une manière frappante la similitude à peu près complète qui existe entre les variations des quatre stations, quant à ce qui concerne leur amplitude aux mêmes heures. Elles croissent en général plus rapidement dans la première et dans la seconde heure qui suit le lever du soleil, et elles ne dépassent à aucune heure l'amplitude qu'elles acquièrent de 7 à 9 heures du matin, du moins à Hobart-Town, au Cap et à Sainte-Hélène; à Toronto, la plus grande amplitude de la variation a lieu de 6 à 8 heures du matin. En général dans toutes les stations les variations sont bien plus considérables pendant les heures du jour que pendant celles de la nuit.

Ce n'est pas seulement, comme on le comprend, sur les variations diurnes de déclinaison que se fait sentir l'influence de la position du lieu d'observation. Cette influence n'est pas moindre sur la variation des autres éléments magnétiques. C'est encore dans le recueil si précieux du colonel Sabine qu'on peut trouver les nombreux résultats qui nous permettent d'établir sous ces divers rapports une comparaison entre les différentes stations[1].

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans insister sur un fait intéressant qui ressort de la comparaison des observations magnétiques de Toronto et d'Hobart-Town. Ces deux stations ont ceci de très-important que leurs mouvements magnétiques sont en général inverses, ce qui résulte de leur position presque symétrique dans les deux hémisphères. Le tableau suivant dans lequel se trouve consignée la valeur de la variation diurne de chaque mois pour chacune des deux stations, fait bien ressortir cette opposition.

[1] Nous avons consigné dans une note finale C, les résultats numériques les plus importants relatifs aux éléments magnétiques des principales stations où se font actuellement les observations.

	Hobart-Town (lat. 42° 51′ S.).	Toronto (lat. 43° 39′ N.).
Janvier	11′66	6′51
Février	11′80	6′40
Mars	9′50	8′50
Avril	7′26	9′52
Mai	4′56	10′34
Juin	3′70 Hiver.	11′99
Juillet	4′61	12′70 Eté
Août	5′89	12′68
Septembre	8′24	9′72
Octobre	11′01	7′52
Novembre	12′05 Été.	5′73
Décembre	11′81	4′47 Hiver.

Mais l'opposition n'existe plus si, au lieu de la variation de la déclinaison, il s'agit de la variation de l'intensité. Ainsi à Toronto, pendant que le soleil est dans l'hémisphère austral, l'inclinaison est de 0,′88 au-dessus, et l'intensité horizontale de 0,0015 au-dessous de leur moyenne respective; tandis que, quand le soleil est dans l'hémisphère boréal, c'est 0′9 au-dessous, et 0,0011 au-dessus. La somme des différences d'inclinaison correspond à 0,007 de variation dans la composante horizontale de l'intensité, ce qui amène à conclure que l'intensité totale a son maximum en hiver et son minimum en été. A Hobart-Town, l'inclinaison est de 0′89 au-dessous de la moyenne quand le soleil est dans l'hémisphère boréal, et de 0′85 au-dessus quand il est dans l'austral; la composante horizontale de l'intensité est également plus grande que la moyenne à Hobart-Town, du mois d'octobre au mois de février; de sorte qu'on doit en conclure que l'intensité totale y est plus considérable à cette époque de l'année. Ainsi c'est à la même époque, savoir dans l'intervalle compris entre octobre et février, qui est l'hiver pour Toronto et l'été pour Hobart-Town, et non à des époques opposées, que l'inclinaison et l'intensité totale sont à leur maximum, tandis qu'elles sont à leur minimum dans l'intervalle compris entre avril et août, qui est l'été pour Toronto et l'hiver pour Hobart-Town. Il se trouve donc que la partie de l'année où la force magnétique est la plus plus grande et l'aiguille d'incli-

naison la plus rapprochée de la verticale, dans les deux hémisphères également, correspond à l'époque où la terre est la moins éloignée du soleil et où elle se meut le plus rapidement dans son orbite. Ce résultat indique l'existence d'une influence générale sur tout le globe, ayant une période annuelle, et semble désigner le mouvement de la terre dans son orbite comme pouvant acheminer à une explication de ce changement périodique. Toutefois, en ce qui concerne les variations diurnes de déclinaison, Toronto et Hobart-Town suivent la loi générale. L'amplitude de ces variations est, pour chacune des stations, de 12′ environ dans les mois d'été (d'août à octobre pour Toronto, et d'octobre à mars pour Hobart-Town), et de 4 à 6′ dans leur hiver respectif, ainsi que cela résulte du tableau ci-dessus.

Il paraîtrait aussi que la position de la lune par rapport à la terre n'est pas sans influence sur les mouvements de l'aiguille aimantée. M. Plantamour, dans un travail très-complet sur les variations des divers éléments magnétiques à Genève pendant les années 1842 et 1843, avait déjà signalé cette influence. Après avoir montré, par la comparaison des variations qui ont lieu dans un même jour d'une heure de la journée à l'autre, que la déclinaison croît de 8 heures du matin, où elle est la plus faible, jusqu'à 1 heure après midi, époque du maximum, et qu'il y a le soir un second minimum et un second maximum, M. Plantamour, passant à l'examen des variations qui ont lieu à la même heure de la journée d'un jour à l'autre, avait trouvé que la déclinaison à la même heure va en augmentant pendant quelques jours, puis en diminuant jusqu'à ce qu'elle arrive à un second minimum. Le temps compris entre un maximum et le minimum suivant est d'un peu moins de 14 jours, et il est le même que l'intervalle compris entre un minimum et le maximum suivant. La différence moyenne entre un maximum et un minimum est de 3′75. Il semble naturel de chercher la cause de ces variations dans le mouvement de la lune, qui offre des périodes analogues.

M. Kreil et M. Sabine ont tous les deux également cru remarquer l'influence lunaire sur le mouvement de l'aiguille, mais sous une autre forme. Pour se rendre compte de cet effet, ils

ont disposé les vingt-quatre observations faites dans un jour solaire de façon que chacune d'elles fût placée dans un tableau dans l'heure lunaire dont elle se rapproche le plus[1]. De cette manière, la moyenne des observations faites à chaque heure lunaire indiquera la direction relative de l'aiguille à chacune des 24 heures lunaires, c'est-à-dire à 0 heure quand la lune est au méridien supérieur, à 12 heures quand elle est au méridien inférieur, à 6 heures et à 18 heures quand elle est à 90° du méridien, et aux heures intermédiaires quand elle correspond à un angle horaire intermédiaire. Maintenant, quand cela est fait et qu'on a groupé ensemble un certain nombre de lunaisons de manière à contre-balancer et à diminuer par conséquent l'influence des autres causes perturbatrices, on trouve que la direction de l'aiguille subit un changement régulier et périodique dans l'espace d'un jour lunaire; il y a deux époques de maximum de déviation vers l'est et deux de maximum de déviation vers l'ouest, entre deux passages consécutifs de la lune au méridien supérieur de la station ; le changement de position est continu de l'une des déviations extrêmes à l'autre. En raison de la différence qui existe entre les temps solaires et les temps lunaires, les observations groupées sous une certaine heure lunaire finissent par comprendre toutes les heures solaires successives; et par conséquent, quand on prend la moyenne d'un grand nombre d'observations, toute variation provenant de l'action du soleil doit se trouver compensée.

Si l'on compare sous le rapport de l'action lunaire les trois stations de Toronto, d'Hobart-Town et de Sainte-Hélène (le travail n'a pas encore été fait pour le Cap), on remarque qu'à Hobart-Town et à Sainte-Hélène, situées toutes les deux dans l'hémisphère sud, les déclinaisons occidentales sont les plus

[1] On sait que les heures comptées en temps *lunaire* diffèrent de celles comptées en *temps solaire*, en ce qu'il s'écoule en moyenne 24 heures 40′ de temps solaire entre deux passages consécutifs de la lune au méridien. L'heure lunaire est donc un peu plus grande que l'heure solaire, et les observations faites à des intervalles réguliers de temps solaire, ne correspondent pas exactement à des intervalles réguliers d'heures lunaires.

considérables[1], tandis qu'à Toronto, dans l'hémisphère nord, ce sont les orientales. Il y a un autre trait de différence bien marqué entre Toronto et Hobart-Town, quant à l'heure lunaire à laquelle se produisent les déclinaisons extrêmes orientales et occidentales ; à Toronto, les orientales ont lieu presque exactement au moment du passage de la lune au méridien supérieur et inférieur, et les occidentales après la 6e et la 18e heure lunaire. A Hobart-Town, les déclinaisons occidentales ont lieu environ deux heures après le passage de la lune, et les orientales deux heures avant la 6e et la 18e heure lunaire. Ces différences peuvent sans doute donner quelques notions sur la puissance magnétique de la lune, mais avant de pouvoir en tirer des conséquences sous ce rapport, il serait nécessaire de connaître les effets correspondants produits sur les autres éléments magnétiques, l'inclinaison et l'intensité ; or, on ne les a pas encore déterminés.

M. Sabine remarque que dans la variation magnétique occasionnée par la lune, on ne trouve aucune trace de la période décennale découverte par Lamont, dans toutes les variations qui dépendent du soleil, et qui paraît être confirmée par l'ensemble des observations.

Il résulte de l'analyse que nous venons de faire des observations relatives au magnétisme terrestre, observations dont nous n'avons pu donner qu'une idée abrégée malgré l'étendue que nous leur avons consacrée, qu'au milieu d'une si grande diversité dans la valeur des nombreux éléments magnétiques que nous avons étudiés, on peut cependant découvrir quelques lois générales auxquelles ces éléments sont soumis. Le principe fondamental c'est que les éléments magnétiques sont à la fois dépendants du temps, c'est-à-dire de l'époque de l'observation, et de l'espace, c'est-à-dire du lieu de l'observation. Nous avons vu que dans un même lieu la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité éprouvent des changements soit réguliers et périodiques, soit irréguliers. Les premiers sont à la fois *séculaires*

[1] C'est toujours du mouvement du pôle nord de l'aiguille qu'il s'agit, aussi bien dans l'hémisphère austral que dans le boréal.

suivant une période dont les termes ne sont pas encore connus faute d'observations assez prolongées, *annuels*, ce sont les moins prononcés, et enfin *diurnes*, ce sont les plus complexes, car ils varient dans leur grandeur avec les différents mois de l'année et même avec les années, étant sous ce rapport soumis à une période décennale. Quant aux changements irréguliers, ils paraissent obéir eux-mêmes à certaines lois, soit quant aux époques, soit quant aux lieux de leur apparition; car, chose assez remarquable, ils se montrent d'une manière presque toujours simultanée dans les lieux du globe les plus distants les uns des autres, constituant ce que M. de Humboldt appelle des *orages magnétiques*.

L'influence du lieu d'observation sur les éléments magnétiques est également considérable; mais elle ne peut être évaluée exactement qu'autant qu'on tient compte du temps, puisque sans cela aucune comparaison ne serait possible sous ce rapport entre les divers points du globe. Voici en quoi peut se résumer cette influence du lieu :

1° La déclinaison ne paraît pouvoir être rattachée ni de près, ni de loin, à la position géographique; les lieux où la déclinaison est nulle, c'est-à-dire dans lesquels la direction de l'aiguille aimantée coïncide avec le plan du méridien terrestre paraissent déterminer par leur situation sur le globe trois lignes différentes dont deux surtout bien marquées, qui ont la forme générale de méridiens, mais ne sont nullement ni régulières, ni stables. L'une de ces lignes passait à Paris en 1663; elle a eu dès lors un mouvement vers l'ouest, qui paraît s'être arrêté, et elle passe maintenant par Philadelphie. Quant aux lignes qui passent par les points qui, sans avoir une déclinaison nulle, ont la même déclinaison, et qu'on a nommées méridiens magnétiques, elles sont très-irrégulières également et ne forment point des grands cercles de la sphère.

2° L'inclinaison et l'intensité paraissent marcher en général ensemble. Ces deux éléments ont leur moindre valeur dans les régions équatoriales; toutefois, la notion d'un équateur magnétique, c'est-à-dire d'une ligne passant sur la sphère terrestre par tous les points à la fois où l'inclinaison serait nulle et

l'intensité aurait sa moindre valeur, ne paraît pas pouvoir être admise, sinon très-approximativement. Mais à partir des régions équatoriales, on voit, à mesure qu'on s'avance vers les régions polaires, dans l'un comme dans l'autre hémisphère, l'intensité aussi bien que l'inclinaison, augmenter d'une manière sensible et assez régulière, quoique cependant elles soient loin d'être les mêmes dans des lieux situés sur les mêmes parallèles. Malgré cette uniformité approximative de la marche de l'inclinaison et de l'intensité, ce n'est pas aux points où l'inclinaison est à son maximum, c'est-à-dire à 90°, que se trouve le maximum d'intensité.

3° Les variations ne sont pas les mêmes sur tous les points du globe, quoiqu'elles obéissent en général aux mêmes lois. Ainsi les variations de déclinaison sont de signes contraires dans les deux hémisphères; il n'existe point de lieux où elles soient nulles; seulement dans des points situés entre les tropiques et même dans quelques-uns situés en dehors (tels que le Cap de Bonne-Espérance), le sens de la variation est pendant une moitié de l'année environ, inverse de ce qu'il est pendant l'autre moitié. Quant à l'amplitude des variations des divers éléments magnétiques, elle augmente en général avec l'intensité absolue du magnétisme lui-même, étant plus considérable, à mesure qu'en partant de l'équateur on se rapproche des régions polaires.

§ 3. Hypothèses sur les causes des phénomènes du magnétisme terrestre.

L'examen détaillé que nous avons fait dans le paragraphe précédent des résultats divers et nombreux qu'ont déjà fournis les observations magnétiques si multipliées sur la surface du globe, nous permet maintenant de chercher les causes auxquelles on peut les attribuer.

Un point bien établi, et qui l'avait déjà été par Gilbert, c'est que les forces qui agissent sur l'aiguille aimantée émanent directement du globe terrestre; la simple analyse de ces forces et de leurs effets le démontre; la variation de l'inclinaison

et de l'intensité avec la latitude même et avec la hauteur au-dessus du sol, la nature de l'action directrice, etc., ne sont compatibles qu'avec la notion d'un magnétisme terrestre, c'est-à-dire d'une cause ayant une origine dans la terre. Mais quel est ce magnétisme? Où réside-t-il? Quelle est sa forme, sa distribution, son origine? Voilà les questions qui se présentent naturellement.

Gilbert avait cru que la terre est un aimant et qu'elle a par conséquent deux pôles magnétiques assez voisins de ses pôles terrestres; après lui Halley était arrivé à croire que pour expliquer tous les phénomènes du magnétisme terrestre, il fallait admettre l'existence, non pas de deux, mais de quatre pôles. M. Hansteen, plus tard, était arrivé à la même conclusion et avait même assigné la place de ces quatre pôles. Il faudrait, dans cette hypothèse, admettre que la terre serait traversée par deux aimants se croisant dans son centre, et dont les axes formeraient entre eux un certain angle. Il est vrai qu'il existe dans la terre un oxyde de fer magnétique doué de polarité; M. de Humboldt a fait des observations curieuses sur le magnétisme polaire de certaines roches et même d'une montagne. Mais, outre qu'on ne peut admettre que la terre renferme une assez grande quantité de ces roches magnétiques pour constituer le magnétisme terrestre, on ne comprendrait pas à quoi tiendrait la distribution régulière qu'affecterait leur polarité magnétique. Elles ne peuvent donc jouer d'autre rôle que celui de déterminer des anomalies locales dans la direction générale de l'aiguille aimantée, ou dans l'intensité du magnétisme terrestre.

Au reste, l'hypothèse de pôles magnétiques dans l'intérieur de la terre avait été soumise au calcul par M. Biot qui avait trouvé que pour faire rentrer dans cette hypothèse toutes les observations relatives au magnétisme terrestre, il fallait nécessairement admettre que les deux pôles étaient très-rapprochés l'un de l'autre et à très-peu de distance du centre de la terre. Mais les nouvelles observations, qui ont été faites depuis le calcul de M. Biot, c'est-à-dire depuis quarante ans, ne sont plus compatibles avec l'hypothèse de deux pôles égaux et contraires situés d'une manière quelconque dans l'intérieur de

notre globe ; c'est ce qu'a démontré M. Pouillet, qui, en fondant sur cette hypothèse une formule générale, s'est assuré qu'elle ne pouvait point représenter les résultats des observations, qu'il n'y avait en particulier aucune possibilité de représenter avec une approximation suffisante l'ensemble des déclinaisons observées, ni même des déclinaisons qui appartiennent à l'équateur terrestre ou à un parallèle quelconque, et que cette impossibilité ne résulte pas même des incertitudes qui peuvent exister sur le véritable tracé de l'équateur magnétique. Le calcul montre que, si le magnétisme de la terre était dû à deux pôles magnétiques égaux et contraires situés d'une manière quelconque, il devrait y avoir une exacte symétrie des déclinaisons, aux extrémités d'une même ligne passant par le point où l'axe magnétique traverse l'équateur; or au contraire on voit sur la circonférence de l'équateur une dissymétrie frappante; au lieu de deux points où la déclinaison est nulle on en trouve trois; et au lieu d'avoir des *maxima* de déclinaison égaux et opposés, il arrive que l'un de ces *maxima* surpasse l'autre de plusieurs degrés. Il est donc évidemment impossible d'expliquer les phénomènes magnétiques en supposant que pour tous les points de la terre les centres d'action soient les mêmes.

L'hypothèse des quatre pôles de Halley et M. de Hansteen satisfait-elle mieux aux exigences des observations? Nous le pensons d'autant moins que les points auxquels M. Hansteen a appliqué la dénomination de pôles n'en ont point les caractères; ce sont seulement, comme M. Sabine l'a fait voir, les points de la plus grande intensité magnétique pour deux systèmes qui se distinguent l'un de l'autre par la différence dans le degré de la variation séculaire à laquelle les phénomènes paraissent être sujets dans chacun d'eux. D'ailleurs, pourquoi seulement quatre pôles et deux aimants, une fois qu'on ne peut s'arrêter à l'idée naturelle de deux pôles et d'un seul aimant? Ajoutons encore contre l'hypothèse de pôles magnétiques proprement dits, situés dans l'intérieur du globe, l'impossibilité de concilier l'existence de centres magnétiques puissants plus ou moins près de celui de la terre, avec l'existence bien probable dans cette portion du

globe, d'une très-haute température qui est incompatible avec un magnétisme prononcé.

L'opinion de Gauss, que tout l'ensemble du globe est magnétique et qu'il existe un grand nombre de centres magnétiques, nous paraît infiniment plus rationnelle. Seulement M. Gauss est obligé d'assigner à chaque portion du globe une puissance magnétique moyenne considérable, savoir à chaque huitième de mètre cube la force magnétique d'un barreau aimanté capable de supporter le poids d'une livre.

M. Barlow, après avoir démontré que ni la présence d'un seul aimant, ni l'arrangement de plusieurs aimants dans l'intérieur du globe, ne pourraient produire les phénomènes du magnétisme terrestre, estime qu'on peut, au contraire, en rendre très-bien compte en admettant, comme Ampère, des courants électriques circulant autour du globe terrestre dans la direction à peu près de l'est à l'ouest. Il a cherché à confirmer cette hypothèse en distribuant sur la surface d'un globe en bois une série de courants électriques disposés de façon à produire sur une aiguille aimantée soustraite à l'influence terrestre et placée dans diverses positions, le même genre d'action que la terre lui imprime dans des positions analogues ; et l'expérience a confirmé ses prévisions, du moins d'une manière générale.

Nous sommes très-disposé à croire que les forces qui produisent le magnétisme terrestre ont leur origine dans la portion solidifiée, c'est-à-dire dans l'écorce solide du globe terrestre, ce qui n'empêche pas que les points d'application de leurs résultantes puissent être quelque part dans l'intérieur du globe plus ou moins près de son centre. Dès lors l'idée de courants électriques circulant dans cette enveloppe solide et formant un solénoïde plus ou moins compliqué, nous paraît la plus naturelle. Mais d'où naissent ces courants et quelle est la cause qui détermine leur direction? Nous avons bien admis, pour expliquer l'électricité atmosphérique, une production d'électricité résultante d'actions chimiques qui ont lieu dans l'intérieur du globe terrestre; mais nous ne pourrions comprendre comment ce développement d'électricité pourrait donner naissance à des

courants circulants de l'est à l'ouest. Cette direction doit être évidemment liée au mouvement de rotation de la terre qui a lieu de l'ouest à l'est; et par conséquent ce n'est que dans l'existence de courants d'induction provenant d'une action magnétique extérieure à la terre, mais susceptible de s'exercer sur elle, qu'on pourrait trouver la confirmation de l'hypothèse d'Ampère adoptée par M. Barlow.

En effet, les courants d'induction sont liés plus ou moins, quant à leur direction, avec le sens du mouvement du corps induit; et on sait qu'en faisant tourner rapidement sur son axe un corps rond, sphérique par exemple, sous l'influence d'un pôle magnétique, on peut y déterminer des courants induits continus. Mais où serait, quand il s'agit de la sphère terrestre, le corps inducteur? Evidemment on ne peut le trouver que dans la lune ou dans le soleil. La lune exerce bien une influence sur les mouvements de l'aiguille aimantée, mais cette influence est bien faible, et rien ne nous fait découvrir des traces de magnétisme ou d'électricité dynamique dans la lune, dont la masse d'ailleurs est trop petite par rapport à la terre pour supposer qu'elle puisse agir sur elle; ce serait bien plutôt la terre qui pourrait agir sur la lune[1].

Ce n'est que dans le soleil que nous pourrions trouver un corps extérieur à la terre capable d'exercer sur elle une action inductrice. D'abord le soleil nous paraît posséder des propriétés électro-dynamiques puissantes, car il est bien probable que sa lumière est due à d'énergiques courants électriques qui l'en-

[1] En effet, partant du fait que la terre jouit par une cause ou une autre des propriétés d'un gros aimant plus ou moins irrégulier, il est évident que par son mouvement rapide de rotation, elle doit induire dans la lune, dont le mouvement est bien moindre, des courants fermés plus ou moins intenses suivant la conductibilité des matériaux dont est formé notre satellite. Ce serait l'action de ces courants sur l'aiguille qui expliquerait les légères variations dues à l'influence de la lune. Une question intéressante à résoudre serait, connaissant exactement la distribution du magnétisme terrestre sur notre globe, de rechercher quelle devrait être pour les différentes phases de la lune, la direction des courants induits sur sa surface par le magnétisme de la terre, et de voir si cette direction s'accorderait avec l'effet lunaire signalé par divers observateurs.

tourent; du moins il n'existe pas une lumière artificielle qui ait plus de rapport dans toutes ses propriétés avec la lumière solaire que la lumière électrique, telle que celle qui jaillit entre deux pointes de charbon qui communiquent respectivement avec les deux pôles d'une pile. De plus, les astronomes sont disposés, par des phénomènes d'un autre ordre, à admettre une polarité magnétique dans le soleil. M. Lamont rappelle que Bessel avait déjà mis en avant l'existence d'une pareille force pour expliquer les phénomènes présentés par la comète de Halley, dont une partie de la matière cométaire paraissait attirée par le soleil, et l'autre repoussée dans un sens opposé. Mais, tout en attribuant au soleil une forte puissance magnétique et en reconnaissant que la terre en tournant sous l'influence de cette puissance, doit posséder des courants induits, il y aurait bien des points à examiner avant de faire passer cette simple hypothèse au rang d'une théorie satisfaisante. Il faudrait se faire une idée de la distribution dans le soleil des forces magnétiques pour pouvoir en déduire la direction des courants induits dans le globe terrestre, car, tout en reconnaissant que le sens de la rotation du corps induit a la plus grande part d'influence dans la direction des courants provenant de cette induction, la position du corps inducteur en a aussi une considérable. Le mouvement de la terre dans son orbite, et par conséquent son changement de position par rapport au soleil chaque jour de l'année, pourrait-il se concilier avec la direction à peu près constante de son magnétisme?

Quant à l'irrégularité partielle que doit présenter la distribution des courants induits autour de la terre tout en obéissant à la loi générale de la direction de l'est à l'ouest, elle pourrait très-bien s'expliquer par les différences dans le degré de conductibilité des couches de l'écorce terrestre. On conçoit très-bien que notre globe ne peut pas être assimilé à une sphère creuse d'une épaisseur et d'une nature parfaitement uniformes, et que par conséquent les courants induits ne peuvent pas y avoir une direction aussi régulière que celle qu'ils affecteraient dans une semblable sphère. On sait déjà par les recherches de quelques géologues, et plus particulièrement de M. Louis Nec-

ker, qui le premier a signalé ce rapprochement, qu'il y a une liaison assez marquée entre les lignes d'égale intensité magnétique et la direction de certaines chaînes de montagnes, et par conséquent de certains soulèvements. Le déplacement séculaire de la direction des forces magnétiques du globe ne serait-il point lié à un travail de soulèvement graduel qui s'opérerait au-dessous de sa surface, et qui, en altérant la distribution des matériaux dont se compose son écorce, modifierait par là le sens des courants induits? Ce serait comme un canal dont la direction serait graduellement changée. Ce qui donnerait quelque probabilité à cette hypothèse, c'est que la déclinaison séculaire du pôle nord de l'aiguille aimantée à l'ouest a coïncidé avec le mouvement des glaces polaires, et en particulier avec l'apparition des *banquises*, près des côtes du Groënland; mouvement et apparition que les géologues s'accordent en général à attribuer à un soulèvement graduel du fond de la mer. Quant aux variations d'inclinaison et d'intensité avec la position géographique du lieu d'observation, elles seraient une conséquence rigoureuse des lois de l'électro-dynamique, une fois qu'on admettrait que notre globe est entouré d'une ceinture de courants électriques ayant tous une direction générale de l'est à l'ouest; et les anomalies que présentent cette inclinaison et cette intensité, aussi bien que la déclinaison, seraient un résultat des irrégularités nécessaires qui existent, à cause de sa non-homogénéité, dans la masse traversée par les courants induits.

Au reste, l'influence magnétique du soleil n'est pas une hypothèse gratuite; nous en trouvons une preuve dans la concordance qui existe entre les mouvements magnétiques sur la surface de la terre et les positions diverses du soleil par rapport aux lieux d'observation. On avait d'abord cherché à expliquer cette concordance par une action indirecte du soleil, et à cet égard on avait proposé des hypothèses que nous allons successivement exposer, soit pour montrer en quoi elles sont insuffisantes, soit parce que, si elles ne jouent pas le premier rôle, elles ont du moins une part importante dans l'explication de certains phénomènes du magnétisme terrestre.

La première de ces explications, qui a été essentiellement

développée par M. Aimé, consiste à attribuer les variations diurnes des éléments magnétiques à des courants thermo-électriques émanés tous du point le plus échauffé, point qui, se déplaçant avec le soleil, doit faire le tour du globe en vingt-quatre heures; de sorte qu'en chaque lieu de la terre, excepté sur le parallèle où est le centre d'action, la direction et la force des courants changent pendant toute la durée du jour. Il doit résulter de là que les mouvements diurnes de déclinaison sont généralement symétriques des deux côtés de l'équateur, et le méridien où la température de la croûte terrestre est le plus échauffé se trouvant à peu près celui de 2 heures après midi, c'est vers le lieu où l'équateur est coupé par ce méridien qu'on peut placer le centre où aboutissent les courants thermo-électriques. Les observations faites dans les deux hémisphères sont assez d'accord avec cette hypothèse; mais elle a contre elle, indépendamment d'une objection générale qui est commune à toutes les explications qu'on rattache à une action indirecte du soleil, le peu de probabilité de l'existence de courants thermo-électriques sur la surface de la terre, soit à cause de l'imparfaite conductibilité de cette surface, soit à cause de la proportion énorme d'eau qu'elle présente; or nous avons vu que les liquides ne sont pas susceptibles de thermo-électricité[1].

La seconde explication fondée sur une action indirecte du soleil consiste à admettre l'existence de courants électriques cheminant sur chaque hémisphère des pôles à l'équateur; ces courants seraient la conséquence de la réunion continuelle qui doit avoir lieu entre l'électricité positive qui s'échappant avec la vapeur d'eau de mer, des régions équatoriales vers les régions supérieures de l'atmosphère se rend de là vers les régions polaires, et la négative qui est restée dans le sol. J'ai cherché à montrer, en développant cette explication, que le sens des courants est d'accord avec celui des variations dont les *maxima*

(1) L'influence de la température de la surface du globe sur les phénomènes du magnétisme terrestre avait déjà été signalée par M. Hansteen, qui avait fait l'observation que la température dans le voisinage de trois de ses quatre pôles magnétiques, est beaucoup plus basse que dans d'autres contrées situées sous la même latitude.

Digitized by Google

et les *minima* correspondent pour chaque localité aux époques du jour et de l'année où par l'effet de la position du soleil la température est la plus élevée, et par conséquent l'évaporation la plus forte. Nous reviendrons sur cette explication qui, si elle est, comme nous allons le voir, insuffisante à elle seule pour rendre compte des variations régulières, doit très-probablement être admise pour expliquer une partie des phénomènes dont il s'agit, et en particulier les perturbations; car il est certain que l'électricité atmosphérique ou terrestre, que nous avons vu jouer un si grand rôle dans les phénomènes météorologiques, doit exercer une action sur les mouvements de l'aiguille aimantée. Mais la régularité avec laquelle, par les temps d'orage et pendant les plus violentes tempêtes comme par les temps les plus calmes, l'aiguille aimantée accomplit le plus souvent son oscillation, paraît peu compatible avec une explication qui ferait dépendre cette oscillation uniquement de cette électricité si variable dans ses manifestations.

La troisième explication est celle de Faraday qui attribue les variations magnétiques aux propriétés magnétiques de l'oxygène de l'atmosphère, propriétés qui suivent dans leur degré de force les variations de la température, en ce sens que le réchauffement les atténue, et que le refroidissement les exalte. Suivant le cours du soleil dans ses effets calorifiques sur l'atmosphère, M. Faraday parvient à montrer que les diverses variations qu'éprouve l'aiguille aimantée proviennent des différents états magnétiques de l'atmosphère correspondants à ses divers degrés de température; l'influence des heures du jour et des saisons se trouvant ainsi liée avec les variations de la température qui en résulte pour l'atmosphère. Mais nous ferons à cette explication, outre l'objection générale que nous allons présenter, l'objection particulière que nous avons faite à la précédente, fondée sur la difficulté de faire dépendre les mouvements magnétiques si réguliers dans leur période, d'une action dont l'intensité doit être aussi variable que l'est le réchauffement par l'effet du soleil de l'oxygène de l'atmosphère.

L'objection générale que nous pouvons faire à toutes ces explications, indépendamment de la difficulté de les concilier

avec la régularité des mouvements de l'aiguille aimantée, c'est que l'époque des variations, ainsi que l'a très-bien démontré M. Sabine, ne dépend pas de la position du soleil relativement à chaque lieu d'observation, ce qui devrait nécessairement exister si l'action du soleil est une action indirecte provenant de son effet calorifique, mais dépend de sa position absolue, c'est-à-dire de sa présence dans l'un ou l'autre hémisphère; tellement que par exemple la variation diurne change de sens en même temps à Sainte-Hélène et au Cap de Bonne-Espérance, quoique leur latitude soit très-différente, et ce changement a lieu pour les deux stations, lors même que l'une et l'autre sont dans l'hémisphère austral, au moment où le soleil traverse l'équateur, c'est-à-dire aux deux équinoxes seulement, et non au moment où il traverse les parallèles sur lesquels elles sont situées.

C'est donc, avons-nous dit, dans l'action directe du soleil qu'il faut chercher l'explication des variations ordinaires et périodiques des éléments magnétiques; le Père A. Secchi vient de le démontrer par une analyse remarquable qu'il a faite de ces variations et de leurs rapports avec les positions du soleil.

S'occupant d'abord des variations diurnes et annuelles de la déclinaison, le Père Secchi résume les résultats des observations nombreuses faites sur ces variations en quelques principes, que nous reproduisons d'autant plus volontiers qu'ils donnent une idée à la fois exacte et générale de cet ordre de phénomènes, quelle que soit du reste la théorie qu'on adopte pour les expliquer.

1° Les variations diurnes de l'aiguille aimantée suivent dans leur cours le temps du lieu d'observation.

2° Le pôle de l'aiguille qui se trouve le plus rapproché du soleil (le pôle sud dans notre hémisphère) exécute une double excursion diurne de la manière suivante : il se trouve à un maximum d'excursion occidentale quatre ou cinq heures avant que le soleil passe au méridien du lieu; de là il marche vers l'orient avec une vitesse croissante, dont le maximum se présente vers le passage du soleil par le méridien magnétique, et il atteint la limite de son excursion orientale une ou deux

heures après ce passage. Lorsque le soleil s'abaisse pour se coucher, l'aiguille retourne en arrière, et quand le soleil passe au méridien inférieur, la même oscillation se répète pendant la nuit, mais avec moins d'amplitude. Les heures limites de ces changements varient avec les saisons ; généralement elles s'avancent en été, et se retardent en hiver. Toutes les variations sont les mêmes dans les deux hémisphères, pourvu qu'on change le nom du pôle dont on suit la marche. Comme les points d'inflexion de la courbe diurne dépendent du passage du soleil au méridien magnétique, si deux lieux situés dans l'hémisphère boréal ont des déclinaisons opposées, le premier à l'est, le second à l'ouest, les phases du second seront retardées par rapport à celles du premier. Si les lieux qu'on considère ne sont pas dans le même hémisphère, il faudra tenir compte à la fois de leur déclinaison et de l'opposition qui résulte dans leurs mouvements magnétiques, du fait qu'ils sont dans des hémisphères différents.

3° L'excursion diurne de l'aiguille est la somme de deux excursions séparées, dont la première dépend de l'angle horaire et la seconde de la déclinaison du soleil. Ces deux oscillations, en se superposant d'une manière variable, produisent par leurs interférences tous les phénomènes de variation diurne et annuelle ordinaire. C'est ce qu'on peut constater au moyen des observations faites à Toronto, à Hobarton, à Sainte-Hélène et au Cap de Bonne-Espérance, qui montrent que la position de l'aiguille aimantée à un instant quelconque dépend de la situation du soleil, relativement au méridien du lieu et relativement à l'équateur. On peut éliminer l'effet de l'une de ces causes de façon qu'il ne reste que la seconde. Pour avoir seule la période diurne, on n'a qu'à prendre la moyenne de toutes les observations faites pendant une année à chacune des heures de la journée, et si l'on construit graphiquement une courbe en prenant les heures pour abscisses, et les moyennes de déclinaison ainsi obtenues pour ordonnées, on obtient une courbe qui représente l'oscillation diurne que l'aiguille exécuterait si la déclinaison du soleil était constante. Maintenant on prend seulement ces moyennes pour chaque mois, on a alors une

courbe des moyennes horaires mensuelles qui passe tantôt au-dessus, tantôt au-dessous de la première, qui est celle des moyennes horaires annuelles. Pour apprécier l'effet de la déclinaison du soleil, il n'y a qu'à retrancher les ordonnées de la courbe moyenne annuelle des ordonnées de la courbe moyenne mensuelle; on obtient ainsi une nouvelle courbe représentant pour chaque mois l'effet du déplacement du soleil. On remarque que ces courbes mensuelles sont d'une forme pareille à celle des courbes annuelles, qu'elles sont opposées pour les mois de déclinaison opposée, et que pour les mois équinoxiaux, elles sont très-peu prononcées, de telle façon que l'on y voit prédominer la partie du mois qui participe de la plus grande distance de l'équinoxe; cela est surtout évident pour le mois de septembre pour lequel le changement semble se faire le jour même du passage du soleil à l'équateur. La marche de la courbe indique nettement que la grandeur de l'excursion dépend à la fois de la déclinaison du soleil et de la force magnétique absolue au lieu d'observation [1]. Ainsi les excursions sont moindres à Sainte-Hélène qu'au Cap, moindres au Cap qu'à Hobarton, moindres à Hobarton qu'à Toronto. Le signe des courbes mensuelles ne dépend ni de la latitude géographique ni du passage du soleil au zénith du lieu; c'est ce que M. Sabine avait fait déjà remarquer en ce qui concerne Sainte-Hélène. Évidemment les moments auxquels correspondent dans chaque station ces maxima d'excursion dépendent du passage du soleil au méridien magnétique; toutefois la grandeur des excursions n'est pas en rapport avec les saisons du lieu, mais avec la position absolue du soleil par rapport à la terre; il ne faut pas oublier qu'il s'agit non de l'amplitude des variations diurnes, mais des mensuelles. Ainsi la plus grande excursion mensuelle à Hobarton et au Cap a lieu dans le mois d'août, qui est un mois d'hiver, et cette plus grande excursion a lieu à Toronto dans le même mois, c'est-à-dire en été. A Sainte-Hélène elle ne se

[1] Ce résultat de l'observation est bien favorable à la théorie qui fait dépendre de l'action du soleil, aussi bien la force absolue que la variation qu'elle éprouve dans sa direction et dans son intensité.

produit pas quand le soleil est au zénith, mais bien quand il en est le plus éloigné, savoir dans les mois de juin, juillet et août. Quand on veut éliminer des courbes mensuelles l'effet de la déclinaison solaire, il suffit d'ajouter deux à deux les mois où le soleil a une déclinaison opposée, et on reconnaît alors l'existence d'une période semi-diurne que nous avons déjà constatée, de sorte qu'on peut regarder comme certain que l'aiguille est constamment soumise à une période d'oscillation diurne et à une autre période semi-diurne; cette dernière paraît dépendre plutôt de la latitude géographique que de la latitude magnétique.

Le Père Secchi croit en résumé pouvoir conclure de toutes les phases qu'éprouve la variation de la déclinaison que *le soleil agit sur l'aiguille aimantée comme s'il était lui-même un grand aimant placé à une grande distance de la terre, et ayant ses pôles de même nom que ceux de la terre tournés du même côté du ciel.* Il faut seulement avoir égard pour reconnaître l'exactitude de cette loi aux actions inverses que l'aiguille éprouve de la part du soleil dans les 24 heures par l'effet de la rotation de la terre, la face de l'aiguille qui regarde le soleil étant différente à midi et à minuit, et la terre étant interposée à la seconde époque. Nous reviendrons dans un instant sur la manière dont il faut envisager cette action du soleil sur l'aiguille; mais il nous faut auparavant montrer que les variations des éléments magnétiques, autres que la déclinaison, rentrent dans la même loi.

Les variations de la force horizontale déterminées par le magnétomètre bifilaire, et celles de la force verticale, comparées à Sainte-Hélène, au Cap, à Toronto et à Hobarton, conduisent le Père Secchi à cette solution générale, savoir que la composante horizontale et la composante verticale peuvent se résoudre en périodes diurnes et semi-diurnes qui dépendent de la déclinaison du soleil et de la latitude géographique. Quant à l'inclinaison, ses phases sont analogues à celles de la déclinaison, mais avec une avance de trois heures, et les *maxima* de force horizontale correspondent en général aux *minima* d'inclinaison, ce qui doit être. La force totale est soumise à

Toronto à deux périodes, dont le maximum et le minimum principal sont à 5 heures après midi, et à 3 heures ou 4 heures du matin, et le maximum et le minimum principal à 6 ou 8 heures, et 10 ou 11 heures du matin. A Hobarton, la période secondaire se manifeste moins complétement dans certains mois que dans d'autres, et au Cap les variations de la force totale sont presque complémentaires de celles de la déclinaison[1]. Nous rappelons encore ici l'observation importante de M. Sabine, qu'à Toronto et à Hobarton, la force totale est à son maximum dans les mêmes mois, savoir décembre et janvier, quoiqu'ils correspondent à des saisons opposées dans les deux hémisphères, d'où le Père Secchi conclut que la force perturbatrice solaire est plus grande quand la distance du soleil est plus petite et qu'elle ne dépend pas des saisons.

Il me semble plus naturel d'en conclure que ce n'est pas seulement la force perturbatrice, mais la force même absolue du magnétisme terrestre qui dépend du soleil, d'autant plus que le Père Secchi admet bien que ce n'est pas sur l'aiguille directement qu'agit le soleil, mais qu'il agit sur elle indirectement en modifiant le magnétisme du globe. Or, si l'action du soleil est l'origine des propriétés magnétiques de la terre, soit par un effet direct d'aimantation, soit, ce qui est plus probable,

[1] Pour bien se rendre compte de tout l'ensemble des périodes d'oscillation qu'éprouve l'aiguille, il faut supposer, avec M. Sabine, une aiguille aimantée suspendue non plus par un axe, mais par un seul point savoir son centre de gravité, et qui serait libre d'obéir à toutes les impulsions simultanées quelle que soit leur direction. M. Sabine a construit les courbes que tracerait une aiguille dans ces conditions, en prenant deux axes coordonnés rectangulaires dont l'origine représente la position moyenne diurne de l'aiguille, et en prenant pour chaque heure les déclinaisons pour abscisses et les inclinaisons pour ordonnées. On reconnaît alors que l'oscillation de l'aiguille a toujours dans les vingt-quatre heures une période double, l'une diurne, l'autre nocturne, dont l'extension varie notablement suivant les saisons. La période diurne, très-développée en été, se resserre en hiver ; tandis que la période nocturne, à peine marquée en été, s'étend notablement en hiver. Un caractère remarquable de toutes les périodes simples, c'est que le maximum et le minimum se produisent à six heures de distance environ. On voit que l'aiguille perd sa plus grande vitesse au moment où le soleil passe au méridien magnétique, et que les mouvements d'inclinaison sont complémentaires à 3 heures de distance de ceux de déclinaison.

par la production de courants d'induction ayant la direction générale de l'E. à l'O., il est facile de concevoir que les changements de position relative du soleil et de la terre, soit diurne, soit annuelle, doivent entraîner des modifications dans la direction, l'intensité et la distribution de ces courants. En particulier, la différence qui existe entre la période nocturne et la période diurne serait une conséquence de l'interposition de la terre entre le soleil et le lieu où est l'aiguille, interposition qui doit nécessairement modifier les courants induits; il ne peut y avoir identité à cet égard entre deux points situés, il est vrai, aux extrémités du même diamètre d'une sphère, mais dont l'un est tourné vers le corps inducteur, tandis qu'entre ce corps et l'autre se trouve interposée toute la masse de la sphère. Il y aurait un grand intérêt à étudier soit théoriquement, soit expérimentalement, quelle devrait être la distribution des courants induits sur une sphère conductrice à laquelle un mouvement rapide de rotation serait imprimé sous l'influence d'un fort aimant inducteur, en cherchant à déterminer l'état électrodynamique de chacun des points de la sphère au même instant, ce qui permettrait d'en conclure l'état électrodynamique du même point dans ses positions successives pendant une rotation de la sphère [1].

Comme nous l'avons déjà remarqué, les résultats qu'on obtiendrait dans l'hypothèse d'une sphère conductrice homogène, ne seraient applicables que d'une manière très-générale au cas de la terre, puisque cette homogénéité et cette conductibilité parfaites n'existent pas chez elle; mais c'est sur les phénomènes de direction et d'intensité absolues que cette différence entre le cas réel et le cas hypothétique se ferait surtout sentir; les variations en seraient beaucoup moins influencées, comme on le conçoit facilement, sauf cependant les variations séculaires qui trouveraient leur explication dans les modifications qu'éprouve la constitution même du globe. De semblables modifications doivent entraîner, en effet, des changements dans la direction et l'intensité des courants induits;

[1] Il serait probablement plus facile d'obtenir cette détermination en faisant mouvoir l'aimant plutôt que la sphère.

mais ces changements ne peuvent être que très-lents, comme les modifications qui leur donnent naissance, et par conséquent ne peuvent pas avoir d'influence sensible sur les variations diurnes et même mensuelles.

Nous avons jusqu'ici supposé le soleil immobile, et c'est dans le mouvement seul de la terre que nous avons cherché la cause de l'induction. Or, le soleil a un mouvement autour de son axe, et ce mouvement pourrait modifier son action inductrice plus ou moins suivant la manière dont sont dirigées les forces magnétiques qui en émanent. Cependant il ne paraîtrait pas que cette influence puisse avoir un effet bien sensible. Une circonstance, qui paraît en avoir un plus prononcé, c'est l'état de la surface du globe solaire. On a remarqué une coïncidence assez frappante entre l'augmentation des perturbations de l'aiguille et celle des taches du soleil; c'est dans les années où les taches ont été les moins nombreuses, telles que 1833 et 1843 qu'on a observé le moindre nombre de perturbations magnétiques, et dans celles de 1837-1838 et 1847-1848, où elles ont été les plus nombreuses, qu'il y a eu le plus de perturbations. Mais ce qu'il y a de plus remarquable dans la coïncidence que nous venons de signaler, c'est l'existence d'une période décennale des taches du soleil, qui coïnciderait avec la période décennale constatée par M. Lamont, dans l'amplitude des variations diurnes, de telle façon que les années où il y aurait le plus de taches seraient également celles où l'amplitude des variations serait la plus considérable. M. Arago a également vérifié cette coïncidence.

Nous avons dit plus haut que, tout en reconnaissant que l'action directe du soleil est la principale cause des variations des éléments magnétiques, nous n'excluions pas complétement son action indirecte, telle qu'elle est exercée en particulier par la production des courants électriques qui résultent de la réunion de l'électricité positive qu'emportent les vapeurs qui s'élèvent de la mer, avec la négative restée dans le sol. Cette action est surtout sensible sur l'aiguille de déclinaison, dont les mouvements suivent une période analogue en partie à celle de la température et des autres changements météorologiques diurnes et an-

nuels. Mais elle est nulle sur la variation des composantes horizontale et verticale, et par conséquent sur la variation de l'inclinaison et de l'intensité, qui se manifestent à des heures différentes de celles des changements de température, et qui ont évidemment une autre origine. Cette origine est en effet l'action directe du soleil, qui dépend uniquement de sa position par rapport au lieu d'observation, action qui se manifeste sur la variation de tous les éléments, et par conséquent sur celle de la déclinaison, mais qui n'empêche pas que cette dernière ne provienne aussi et en même temps de l'influence que nous venons de signaler. Les courants engendrés par la réunion de l'électricité positive dont l'atmosphère est chargée, avec la négative qui est restée dans le sol, doivent cheminer dans chaque hémisphère des régions polaires aux régions équatoriales, et par conséquent contribuer à dévier l'aiguille de déclinaison à l'ouest dans l'hémisphère nord, à l'est dans l'hémisphère sud. Plus concentrés près des pôles, ces courants doivent y exercer une action plus puissante que dans les points rapprochés de l'équateur, et leur effet doit être plus ou moins prononcé comme leur intensité qui est elle-même variable avec les circonstances météorologiques, et par conséquent avec les heures de la journée. Leur effet, qui tantôt s'ajoute, tantôt est contraire à celui qui résulte de l'action directe du soleil, étant donc très-variable, il en résulte que, quoiqu'elles obéissent à une loi générale et constante, les variations diurnes de l'aiguille aimantée ne sont pas deux jours dans l'année exactement semblables quant à leur amplitude, ce qui serait difficile à expliquer, si l'action directe du soleil était la seule cause efficiente de ces variations. Une preuve assez frappante du rôle que jouent ces courants dans la production de ce phénomène se trouve dans la remarque de M. Reslhuber, qui en soumettant la grandeur du changement diurne de déclinaison de 1842 à 1850 inclusivement au mode de calcul employé ordinairement pour les phénomènes périodiques, est parvenu, au moyen de nombreuses observations faites à l'Observatoire de Kreusmünster, à établir que *la grandeur de la variation diurne de la déclinaison pendant tous les mois de l'année marche parallèlement avec les changements de*

Digitized by Google

l'humidité de l'air; elle est la plus petite à l'époque de la plus grande humidité, et la plus grande lors du minimum d'humidité. Ce rapprochement entre l'amplitude de la variation de l'inclinaison et le degré plus ou moins grand de l'humidité de l'air, ne peut provenir que de ce que l'électricité positive qui est dans l'atmosphère pouvant se réunir d'autant plus facilement avec la positive du sol que l'air est plus humide, les courants dirigés du pôle à l'équateur, et par conséquent la déviation de l'aiguille qu'ils déterminent, sont d'autant plus faibles qu'une proportion plus grande des deux électricités s'est neutralisée directement, et par conséquent que l'air est plus humide.

Mais c'est surtout dans la production des perturbations de l'aiguille que l'action des courants dont il s'agit fait sentir son influence. Ce sont eux probablement qui constituent cette onde polaire dont parle M. Bravais, qui agit concurremment avec l'onde équatoriale, c'est-à-dire avec l'influence qui semble provenir de l'équateur, et qui elle-même serait le résultat de l'action directe du soleil. Cette origine de l'onde polaire expliquerait pourquoi les perturbations sont d'autant plus prononcées et plus fréquentes que les stations où on les observe sont plus rapprochées des pôles. Elle serait moins facile à concilier, il est vrai, avec le fait si remarquable de la simultanéité généralement observée des perturbations dans des lieux de la terre les plus distants les uns des autres, quoique cependant on puisse concevoir une solidarité assez complète, sous le rapport de leur état électrique, entre toutes les parties du globe terrestre, une fois qu'il est reconnu que ce globe est un très-bon conducteur. Au reste, le phénomène des perturbations magnétiques étant intimement lié à celui qui doit faire l'objet particulier de notre étude dans le paragraphe suivant, nous renvoyons à ce paragraphe tout ce que nous aurions encore à dire sur son origine.

§ 4. Phénomènes naturels liés avec le magnétisme terrestre. — Aurores boréales.

Le siége du magnétisme terrestre étant dans la terre elle-

même, il semble que les phénomènes qui se passent à sa surface ou à son intérieur doivent modifier ce magnétisme ou être modifiés par lui. Jusqu'ici cependant cet ordre de relations n'a pas été constaté d'une manière bien positive; il est pourtant probable que les variations qu'ont éprouvées, depuis qu'on les observe, la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité magnétiques ont dû dépendre de changements survenus à la surface du globe, tels que le déplacement des glaces polaires, ou de modifications éprouvées par les couches inférieures de la terre, telles que soulèvements, affaissements, etc. Mais ces changements et ces modifications ont lieu d'une manière en général si lente et si continue qu'il est difficile de s'assurer s'il existe quelque liaison entre eux et les mouvements de l'aiguille aimantée. Toutefois on a remarqué, en bien des occasions, que l'aiguille aimantée est affectée par les tremblements de terre. Ainsi M. Arago observa, le 19 février 1822, une agitation extraordinaire dans l'aiguille des variations diurnes de l'Observatoire, et il y avait au même moment un fort tremblement de terre en Auvergne, à Lyon et en Suisse. M. Gay a également observé à Valdivia, sur la côte occidentale de l'Amérique du Sud, une perturbation très-remarquable de l'aiguille aimantée à l'époque d'un terrible tremblement de terre qui eut lieu dans ces parages en février 1836.

Mais parmi les phénomènes naturels, il en est un dont la connexion avec le magnétisme terrestre est si bien établie que l'on a, dans le mouvement qu'éprouve l'aiguille aimantée, une preuve de sa présence. Ce phénomène est celui de l'aurore boréale ou plutôt de l'aurore polaire, car il y a des aurores australes aussi bien que des aurores boréales. Voici la description qu'en donne M. de Humboldt dans le *Cosmos* à qui je l'emprunte, à cause de la manière remarquable avec laquelle les principaux détails de l'apparence du phénomène y sont exposés, de façon à en faire ressortir les points essentiels.

« Une aurore boréale est toujours précédée de la formation à l'horizon d'une sorte de voile nébuleux qui monte lentement jusqu'à une hauteur de 4 à 6, à 8, et même de 10 degrés. C'est vers le méridien magnétique du lieu que le ciel, d'abord pur,

commence à se rembrunir. A travers ce segment obscur, dont la couleur passe du brun au violet, les étoiles se voient comme à travers un épais brouillard. Un arc plus large, mais d'une lumière éclatante, d'abord blanc, puis jaune, borde le segment obscur. Quelquefois l'arc lumineux paraît agité pendant des heures entières, par une sorte d'effervescence et par un continuel changement de forme avant le lever des rayons et des colonnes de lumière, qui montent jusqu'au zénith. Plus l'émission de la lumière polaire est intense, et plus vives en sont les couleurs, qui du violet et du blanc bleuâtre passent par toutes les nuances intermédiaires, au vert et au rouge purpurin. Tantôt les colonnes de lumière paraissent sortir de l'arc brillant, mélangées de rayons noirâtres semblables à une fumée épaisse, tantôt elles s'élèvent simultanément en différents points de l'horizon; elles se réunissent en une mer de flammes dont aucune peinture ne saurait rendre la magnificence, car à chaque instant de rapides ondulations en font varier la forme et l'éclat. Le mouvement paraît accroître la visibilité du phénomène. Autour du point qui répond, dans le ciel, à la direction prolongée de l'aiguille d'inclinaison, les rayons paraissent se rassembler, et former la couronne boréale. Il est rare que l'apparition soit aussi complète et se prolonge jusqu'à la formation de la couronne; mais quand celle-ci paraît, elle annonce toujours la fin du phénomène. Les rayons deviennent alors plus rares, plus courts et moins vivement colorés. On ne voit bientôt plus sur la voûte céleste que de larges taches nébuleuses immobiles, pâles ou d'une couleur cendrée; elles ont déjà disparu que les traces du segment obscur, par où l'apparition débute, persistent encore à l'horizon. »

La liaison qui paraît exister entre la lumière polaire et l'apparition d'une certaine espèce de nuages est confirmée par tous les observateurs; tous ont affirmé que la *lumière polaire émettait ses plus vifs rayons lorsque les hautes régions de l'air contenaient des amas de cirro-stratus assez ténus et assez légers pour faire naître une couronne autour de la lumière.* Quelquefois ces nuages se groupent et s'arrangent à peu près comme les rayons d'une aurore boréale; alors ils paraissent troubler l'aiguille

aimantée[1]. Après une brillante aurore boréale, on a pu reconnaître dans la matinée suivante des traînées de nuages qui avaient paru pendant la nuit autant de rayons lumineux.

La hauteur absolue des aurores boréales a été estimée d'une manière très-différente par les observateurs. On a cru longtemps pouvoir la déterminer en regardant, de deux endroits très-distants l'un de l'autre, la même partie de l'aurore, par exemple, la couronne; mais on partait d'une base inexacte, savoir que les deux observateurs avaient bien les yeux dirigés sur le même point en même temps, tandis qu'il est bien prouvé maintenant que la couronne est un effet de perspective dû à la convergence apparente des rayons parallèles situés dans le méridien magnétique; de sorte que chacun voit son aurore boréale comme chacun voit son arc-en-ciel. Aussi l'aspect du phénomène dépend-il de la position de l'observateur. Le siége de l'aurore boréale est dans les régions supérieures de l'atmosphère; quelquefois même il paraît qu'elle se produit dans les régions moins élevées où se forment les nuages. C'est du moins ce qui résulte de quelques observations, de celles notamment du capitaine Franklin, qui vit une aurore boréale dont la lumière lui parut éclairer la surface inférieure d'une couche de nuages, tandis qu'à 30 ou 40 kilomètres plus loin, M. Kendal qui avait veillé toute la nuit sans perdre le ciel de vue un seul moment, n'aperçut aucune trace de lumière. Le capitaine Parry a vu une aurore boréale se dessiner contre le flanc d'une montagne, et on assure qu'on a aperçu quelquefois un cercle lumineux sur la surface même de la mer, autour du pôle magnétique. Le lieutenant Hood et le docteur Richardson s'étant placés à une distance d'environ 18 lieues l'un de l'autre, pour faire des observations simultanées d'où l'on pût conclure la parallaxe du phénomène, et par conséquent sa hauteur, furent conduits à reconnaître que l'aurore boréale n'était pas à une hauteur supérieure à deux lieues. Enfin M. Liais ayant eu l'occasion

[1] Le Père Secchi a remarqué que les perturbations magnétiques se manifestent à Rome pendant que le ciel est voilé de nuages légèrement phosphorescents, qui de nuit présentent l'apparence de faibles aurores boréales.

d'appliquer une méthode, qu'il a imaginée pour mesurer la hauteur des aurores boréales, à une aurore vue à Cherbourg le 31 octobre 1853, a trouvé que l'arc de cette aurore était à environ 4,000 mètres au-dessus du sol pour son bord inférieur[1].

Mairan et Dalton avaient cru que l'aurore boréale était un phénomène cosmique et non atmosphérique. Mais déjà M. Biot, qui avait eu l'occasion d'observer lui-même les aurores aux îles Schetland en 1817, avait été conduit à reconnaître que c'est un phénomène atmosphérique, par la considération que les arcs et les couronnes de l'aurore ne participent nullement au mouvement apparent des astres d'orient en occident, preuve qu'ils sont entraînés par la rotation de la terre. Dès lors, presque tous les observateurs sont arrivés à la même conclusion; nous citerons en particulier MM. Lottin et Bravais qui ont observé plus de cent quarante-trois aurores boréales.

Il est donc bien constant maintenant que l'aurore boréale n'est point un phénomène extra-atmosphérique. Aux preuves tirées de l'apparence même du phénomène, on peut en ajouter d'autres tirées de certains effets qui l'accompagnent, tels que le bruit de crépitation que les habitants les plus rapprochés du pôle affirment entendre quand il y a apparition d'une aurore, et que l'odeur sulfureuse qui l'accompagne. Enfin, si le phénomène se passait en dehors de notre planète et de son atmosphère, pourquoi n'aurait-il lieu qu'aux régions polaires?

M. de Tessan qui, dans le voyage autour du monde de la *Vénus*, a eu l'occasion de voir une belle aurore australe, qu'il décrit avec beaucoup de soin, estime aussi que ce phénomène se passe dans l'atmosphère. Le sommet de l'aurore boréale

[1] La méthode de M. Liais consiste à mesurer les temps t et t' qu'il faut à un arc de l'aurore pour parcourir le même angle, suivant son rayon au zénith et à l'horizon; en admettant que toutes les parties d'un même arc se meuvent avec la même vitesse, on a $h\left(\frac{t'^2}{t^2}-1\right)=2r$, h étant la hauteur cherchée, et r le rayon de la terre. On peut, en se servant du rapport moyen des mouvements angulaires des pieds et des arcs de l'aurore, déterminé au moyen d'un certain nombre d'observations, se passer de l'hypothèse de l'égalité des vitesses.

étant dans le méridien magnétique, il n'était élevé que de 14° au-dessus de l'horizon, et le centre de l'arc était sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison, l'inclinaison étant d'environ 68° au lieu d'observation. M. de Tessan n'a pas entendu de bruit provenant de l'aurore, ce qu'il attribue à ce qu'il était trop éloigné du lieu du phénomène; mais il rapporte l'observation d'un officier distingué de la marine française, M. Verdier, qui, dans la nuit du 13 octobre 1819, étant dans les parages de Terre-Neuve, avait entendu très-distinctement une sorte de pétillement, soit de crépitation, lorsque le bâtiment qu'il montait s'était trouvé au milieu d'une aurore boréale.

Au reste, elle trouve sa confirmation dans le fait généralement admis par les habitants des régions boréales que, quand les aurores paraissent basses, on entend un craquement semblable à celui de l'étincelle électrique. Les Groënlandais croient que les âmes des morts se battent alors dans les airs. M. Ramm, inspecteur des forêts de Norwége, écrivait à M. Hansteen en 1825, qu'il avait entendu ce bruit qui coïncidait toujours avec l'apparition des jets lumineux, quand, n'ayant que dix ans, il avait traversé une prairie couverte de neige et de givre près de laquelle il n'existait pas de forêts. Le docteur Gisler, qui a longtemps habité le nord de la Suède, remarque que la matière des aurores boréales descend quelquefois si bas qu'elle touche le sol; au sommet des hautes montagnes, elle produit sur la figure des voyageurs un effet analogue à celui du vent. Le docteur Gisler ajoute qu'il a souvent entendu le bruit des aurores et qu'il ressemble à celui d'un fort vent ou au bruissement que font quelques matières chimiques dans l'acte de leur décomposition. M. Necker, qui a décrit un grand nombre d'aurores qu'il a observées à la fin de 1839 et au commencement de 1840 à l'île de Sky en Écosse, n'a jamais lui-même entendu le bruit dont il s'agit; mais il remarque que ce bruit a été entendu très-souvent d'une personne chargée des observations météorologiques au phare de Swenburghead (à l'extrémité méridionale du Shetland). Du reste, M. Necker, comme tous les autres observateurs, signale les gelées blanches, les chutes de pluie et de neige comme accompagnant l'apparition des

aurores. M. Necker n'est pas le seul qui n'ait pas entendu le bruit; MM. Lottin et Bravais, qui ont observé un si grand nombre d'aurores, ne l'ont jamais entendu non plus, et un grand nombre d'autres observateurs sont dans ce cas. Cette divergence peut tenir à ce qu'il faut être très-rapproché de l'aurore pour entendre la crépitation dont il s'agit, et à ce qu'il est possible aussi qu'elle n'ait pas toujours lieu, du moins d'une manière assez forte pour être entendue.

Nous venons de signaler, comme effets concomitants de l'aurore boréale, un bruit de crépitation analogue à celui de décharges éloignées et une odeur sulfureuse semblable à celle qui accompagne la chute de la foudre. M. Matteucci a encore observé à Pise, pendant l'apparition d'une forte aurore boréale, des signes prononcés d'électricité positive dans l'air. Mais, de tous les phénomènes, ceux qui ont le plus invariablement lieu en même temps que l'apparition d'une aurore boréale, ce sont les effets magnétiques. Les aiguilles aimantées éprouvent dans leur direction normale des perturbations qui la font dévier en général, à l'ouest d'abord, puis ensuite à l'est. Ces perturbations varient d'intensité; mais elles ne manquent jamais d'avoir lieu, et se manifestent même dans des lieux où l'aurore boréale n'est pas visible. Cette coïncidence, constatée par M. Arago sans aucune exception, pendant plusieurs années d'observation, est telle que le savant français a pu, sans jamais être pris en défaut, accuser, du fond des caves de l'Observatoire de Paris, l'apparition d'une aurore boréale dans notre hémisphère. M. Matteucci a eu l'occasion d'observer, sous une forme nouvelle et remarquable, cette influence magnétique : il a vu, pendant l'apparition de l'aurore boréale du 17 novembre 1848, les armures de fer doux servant aux télégraphes électriques placés entre Florence et Pise rester attachées à leurs électro-aimants, comme si ceux-ci étaient fortement aimantés, sans que cependant l'appareil fût en action et sans que les courants des piles fussent mis en activité. Cet effet singulier cessa avec l'aurore, et le télégraphe ainsi que les piles purent opérer de nouveau sans avoir éprouvé aucune altération. M. Highton a aussi observé, en Angleterre, une action bien prononcée de l'aurore

boréale sur un fil télégraphique; le télégraphe fut mis hors de service pendant trois heures par l'effet de l'aurore boréale du 17 novembre 1848; l'aiguille aimantée était toujours rejetée du même côté, même avec beaucoup de force.

M. de Tessan cite encore une observation faite en 1848, dans les mêmes parages de Terre-Neuve où ont été faites celles dont nous avons déjà parlé, par un officier de marine, M. Baral, qui s'aperçut, au bout de quelques jours, qu'on avait fait fausse route en suivant les indications des compas; et, vérification faite, on trouva toutes les boussoles du bord affolées. Il n'y avait eu cependant, depuis les dernières observations de déclinaison magnétique, aucun orage, aucun tonnerre, aucun phénomène électrique apparent; on n'avait pas touché aux compas. Seulement, le soir même du jour où les dernières observations de déclinaison avaient été faites, il y avait eu une aurore boréale des plus brillantes, et M. Baral n'avait pas hésité d'attribuer à l'influence de cette aurore l'affolement des boussoles, conclusion d'autant moins suspecte d'être dictée par la théorie, qu'à cette époque (1848) les rapports entre l'électricité et le magnétisme n'étaient pas encore connus.

La liaison intime et constante qui règne entre le phénomène de l'aurore boréale et le magnétisme terrestre a fait désigner, par M. de Humboldt, comme nous l'avons déjà dit, sous le nom d'*orage magnétique*, l'ensemble des perturbations qui se manifestent dans l'équilibre des forces magnétiques de la terre. La présence de cet orage est accusée par les oscillations de l'aiguille aimantée, et ensuite par l'apparition de l'aurore, dont ces oscillations sont comme les avant-coureurs, et qui elle-même met fin à l'orage, comme dans les orages électriques un phénomène de lumière, l'éclair, annonce que l'équilibre, momentanément troublé, vient de se rétablir enfin dans la distribution normale de l'électricité.

Si nous rapprochons les détails que nous venons de donner des lois de l'électricité et du magnétisme que nous avons déjà exposées, il nous semble qu'il ne faut pas aller chercher ailleurs que dans l'électricité elle-même, et dans l'influence mutuelle que cet agent à l'état de mouvement et le magnétisme exercent

l'un sur l'autre, l'origine de l'aurore boréale et l'explication des phénomènes qui l'accompagnent. C'est ce que nous allons essayer de démontrer avant d'entamer l'exposition des nombreuses observations que nous avons encore à rapporter sur le phénomène lui-même, observations dont les résultats, comme nous le verrons, nous fourniront une confirmation remarquable de la vérité de notre théorie.

Nous avons vu que l'atmosphère est constamment chargée d'électricité positive, électricité fournie par les vapeurs qui s'élèvent de la mer essentiellement dans les régions tropicales, et que la terre est par contre électrisée négativement; la recomposition ou neutralisation des deux électricités contraires de l'atmosphère et du globe terrestre, s'opère au moyen de l'humidité plus ou moins grande dont sont imprégnées les couches d'air inférieures. Mais c'est surtout dans les régions polaires où les glaces éternelles qui y règnent, condensent constamment les vapeurs aqueuses sous forme de brume que cette recomposition doit s'opérer, d'autant plus que les vapeurs positives y sont portées et accumulées par le courant tropical qui, à partir des régions équatoriales où il occupe les parties les plus élevées de l'atmosphère, s'abaisse à mesure qu'il s'avance vers les latitudes les plus élevées, jusque dans le voisinage des pôles où il vient en contact avec la terre. C'est donc là que la décharge entre l'électricité positive des vapeurs et la négative de la terre, doit essentiellement avoir lieu avec accompagnement de lumière quand elle est suffisamment intense, si, comme c'est presque toujours le cas près des pôles et quelquefois dans les parties supérieures de l'atmosphère, elle rencontre sur sa route des particules glacées extrêmement ténues, qui forment les brumes et les nuages très-élevés.

Nous avons déja dit, et nous en verrons de nouvelles preuves plus loin, que l'apparition de l'aurore boréale est effectivement liée avec la présence dans l'atmosphère de ces particules de glace formant comme une espèce de brume ténue qui, devenant lumineuse par la transmission de l'électricité, doit apparaître simplement comme une surface éclairée plus au moins étendue et plus ou moins découpée. C'est bien ainsi que le phénomène

se passe dans les parties de l'atmosphère les plus éloignées de la terre. On aperçoit ce qu'on nomme des *plaques aurorales* d'une couleur pourpre ou rouge violet, plus ou moins étendues, selon que cette espèce de voile formé par des particules glacées, s'étend plus ou moins loin à partir des pôles. La ténuité de ce voile est telle qu'elle permet d'apercevoir les étoiles à travers les plaques aurorales, et, quant à son existence, indépendamment des preuves indirectes que nous en avons données par l'apparition des phénomènes qui en sont la conséquence, nous en avons une démonstration directe dans l'observation de MM. Bixio et Barral qui, s'étant élevés en ballon à une grande hauteur, se trouvèrent tout d'un coup, quoique le ciel fût parfaitement serein et l'atmosphère sans nuage, au milieu d'un voile parfaitement transparent formé par une multitude de petites aiguilles glacées si fines qu'elles étaient à peine visibles.

Maintenant, si nous examinons ce qui doit se passer dans la portion de la brume lumineuse, qui est la plus rapprochée du globe terrestre et par conséquent des régions polaires, nous trouverons que le pôle magnétique [1] doit exercer sur cette matière électrisée, qui est un véritable conducteur mobile traversé par une succession de décharges, une action analogue à celle qu'exerce dans l'expérience que nous avons décrite en nous occupant des effets lumineux de l'électricité, le pôle d'un électro-aimant sur les jets de lumière électrique qu'on y fait converger dans l'air extrêmement raréfié [2]. Nous avons vu que, dès que le cylindre de fer doux qui sert d'électro-aimant est aimanté, la lumière électrique, au lieu de partir indifféremment des divers points de la surface supérieure qui sert de pôle, comme cela avait lieu avant l'aimantation, part uniquement de tous les points de la circonférence de cette surface, de manière à former autour d'elle comme un anneau lumineux continu. Cet anneau a un mouvement de rotation autour du cylindre aimanté,

[1] Nous désignons sous ce nom le point d'application de la résultante des forces magnétiques émanées du globe, sans nous préoccuper de la nature et de l'origine de ces forces.

[2] Tome II, page 248, figure 220.

tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, suivant la direction de la décharge et le sens de l'aimantation. Enfin quelques jets plus brillants semblent partir de cette circonférence lumineuse sans se confondre avec le reste de la gerbe. Dès que l'aimantation cesse, le phénomène lumineux redevient ce qu'il était auparavant, et ce qu'il est généralement dans l'expérience connue sous le nom de l'*œuf électrique*.

Or, ce qui se passe en petit dans l'expérience dont nous venons de parler est exactement ce qui a lieu en grand dans le phénomène de l'aurore boréale. En effet, M. Hansteen[1], et après lui MM. Lottin et Bravais, ont été conduits à admettre comme conséquence de leurs nombreuses observations, que l'arc de l'aurore boréale est un anneau lumineux dont les différents points sont sensiblement à égale distance de la terre, et qui est

[1] Voici exactement comment M. Hansteen s'exprime sur ce point, sans avoir aucune idée préconçue et uniquement d'après les observations :

« Souvent les aurores sortent d'une zone déterminée de la terre, formant un anneau placé autour du pôle magnétique, et située sans doute dans l'Amérique du Nord. Il se dessine alors dans le ciel une zone ou un cercle de lumière, qu'on peut considérer comme tracé sur une sphère concentrique à la terre. Si l'on fait passer un plan horizontal par le point où est situé le lieu d'observation, on ne voit de ce point qu'un arc du cercle ; on en aperçoit plus d'une moitié de Christiania à cause de l'élévation, et il y paraît elliptique à cause de l'obliquité de sa situation. J'ai vu deux fois l'ellipse presque tout entière. Le plus communément nous voyons ici (Christiania) le sommet de l'arc ou son point le plus rapproché de nous, au nord de notre zénith ; mais en Islande et au Groënland on est presque toujours au dedans du cercle. En Islande on aperçoit le sommet de l'arc au sud dans le méridien magnétique. Au Groënland, où la déclinaison approche de 90° et où par conséquent l'arc est dirigé du sud au nord, son sommet paraît à l'est. Que d'ordinaire la lumière boréale sorte en effluve d'un cercle grand ou petit tracé autour du pôle magnétique, c'est ce qui me paraît évident par l'observation suivante : *Pendant l'aurore boréale et plusieurs jours après, l'intensité horizontale est notablement diminuée*, et elle reprend seulement peu à peu sa valeur habituelle. Au contraire, *la moyenne déclinaison diurne reste à peu près invariable*. L'effusion se faisant dans une zone coupée symétriquement par le méridien magnétique, l'intensité est affectée isolément sans que la direction moyenne soit changée. Lorsque certains filets sortent de terre, des rayons lumineux semblent jaillir de l'arc. Pour que le sifflement soit entendu au lieu d'observation, il faut que les filets jaillissent de terre tout autour de l'observateur avec véhémence et par un air très-calme. »

centré autour du pôle magnétique boréal, de manière à couper à angles droits tous les méridiens magnétiques qui convergent vers ce pôle [1]. Un tel anneau, vu par un observateur placé à la surface du sol, lui offre évidemment l'apparence connue de l'arc de l'aurore, et son sommet *apparent* est toujours nécessairement situé dans le méridien magnétique du lieu. M. Bravais observe, en outre, que l'arc semble éprouver une sorte de mouvement de rotation de l'ouest à l'est, en passant par le sud. Toute cette description du phénomène est parfaitement d'accord avec le résultat de l'expérience que je viens de rappeler, et le sens du mouvement de rotation de l'anneau lumineux est précisément celui qui doit avoir lieu d'après les lois qui régissent l'action mutuelle des courants, si c'est bien l'électricité positive qui part de l'atmosphère pour se diriger vers la surface du sol, y pénétrer autour du pôle magnétique nord, se réunir à la négative et constituer ainsi le courant.

Le diamètre de l'anneau lumineux est d'autant plus grand que le pôle magnétique est plus éloigné de la surface du sol, puisque ce pôle doit se trouver sur l'intersection du plan de l'anneau avec l'axe du globe terrestre; si l'on pouvait déterminer rigoureusement la position de l'aurore boréale, on aurait ainsi un moyen de connaître exactement celle du pôle lui-même.

Il résulte de ce qui précède que chaque observateur voit ainsi le sommet de l'arc auroral à son méridien magnétique; il n'y a donc que ceux qui sont sur le même méridien magnétique qui voient le même sommet et qui puissent, par des observations simultanées, en prendre la hauteur.

Si le sommet de l'arc dépasse le zénith de l'observateur, celui-ci est entouré de toutes parts par la matière de l'aurore boréale qui sort de terre [2]. C'est alors qu'en étant plus rappro-

[1] M. Quetelet, en compulsant les récits d'anciennes observations, a trouvé dans la position des aurores boréales un déplacement qui indiquerait que du temps d'Aristote, il y a 2200 ans, la région magnétique la plus forte était de 24° à l'est de Bruxelles, au lieu de 20° à l'ouest comme elle l'est maintenant.

[2] Cette matière n'est pas autre chose que les vapeurs aqueuses traversées par

ché du lieu où se passe le phénomène, il entend le bruissement que nous avons signalé, surtout s'il est en rase campagne et dans un endroit tranquille; tandis que si l'arc n'atteint pas son zénith, l'observateur se trouve en dehors de la région où s'opère l'émanation du courant électrique, il ne voit qu'un arc un peu plus élevé au nord ou au sud, suivant qu'il se trouve dans l'un ou l'autre hémisphère, et il n'entend aucun bruit, à cause de son trop grand éloignement. Le bruissement dont nous venons de parler est le résultat de l'action d'un pôle magnétique puissant sur des jets électriques lumineux très-rapprochés de ce pôle, ainsi que me l'a prouvé l'expérience directe par laquelle j'ai réussi à produire un bruit parfaitement semblable en rapprochant d'un morceau de fer fortement aimanté l'arc lumineux qui se dégage entre les pôles d'une batterie voltaïque[1]. Quant à l'odeur sulfureuse que quelques observateurs ont sentie en étant également au milieu, pour ainsi dire, de l'aurore boréale, elle provient, comme celle qui accompagne la chute de la foudre, de la conversion en ozone de l'oxygène de l'air, par le passage des décharges électriques.

La lumière de l'aurore boréale n'est point polarisée, c'est ce qu'avait déjà remarqué M. Biot en 1817 dans ses observations aux îles Shetland. Ce résultat négatif a été confirmé par M. Macquorn Rankine, qui a montré que cette absence de polarisation ne tient point à la faiblesse de la lumière de l'aurore boréale, puisque cette même lumière, vue par réflexion sur l'eau, se trouve être polarisée par le fait de cette réflexion. Or, l'étude la plus attentive de la lumière électrique artificielle, aussi bien celle des décharges à travers l'air que celle de l'arc voltaïque dans le vide, n'a pu y faire découvrir la moindre trace de polarisation : nouvelle preuve de l'identité des deux genres de phénomènes. Mais c'est surtout dans la concordance

les décharges, et qui en général ne sont lumineuses qu'à une certaine hauteur du sol, soit parce que l'air y est plus raréfié, soit parce qu'elles-mêmes se trouvent congelées, et plus susceptibles par conséquent de dégager la lueur électrique.

[1] Tome II, pages 238 et suivantes

de l'apparition des aurores avec celle de certains nuages ainsi qu'avec les perturbations de l'aiguille aimantée, que nous trouvons encore une importante confirmation de notre théorie.

Les observations du docteur Richardson, dont nous avons parlé plus haut, en montrant que l'aurore se trouve à des hauteurs qui ne sont pas considérables, indique en même temps qu'elle est liée à la formation et aux modifications variées des *cirro-stratus*. Le lieutenant Hood, en parlant du mouvement des bandes lumineuses de l'aurore, dit qu'il est convaincu qu'elles sont emportées par le vent, parce que les colonnes conservent exactement leur situation relative, ce qui n'a jamais lieu quand la matière lumineuse se meut dans l'air par son action directe et propre. Enfin, ce qui prouve la coexistence avec l'aurore boréale de petites aiguilles de glace dans l'atmosphère telles qu'on en trouve dans les nuages élevés, c'est l'observation du docteur Richardson qui, ayant vu par une température de près de 32° centigrades au-dessous de 0° une aurore dont l'arc supérieur était voisin du zénith, remarqua que, quoique le ciel parût parfaitement serein pendant le phénomène, il en tombait une neige fine, à peine apercevable à l'œil nu, mais qu'on découvrait aisément quand elle était reçue sur la main et s'y fondait. On avait observé le même fait précédemment, par un soleil brillant dont les rayons permettaient de voir très-nettement les aiguilles de glace flottantes dans l'air.

Tous les observateurs sont d'accord sur l'existence d'un stratus, soit segment obscur qui, reposant sur l'horizon septentrional, paraît être le fond de toutes les aurores boréales. C'est du moins ce qui résulte des observations nombreuses de M. Struve à Dorpat, et de celles de M. Argelander à Abo; c'est comme un voile qui, quoique laissant passer la lumière des étoiles, donne au ciel un aspect plus sombre; puis ce segment obscur finit par être bordé par un arc lumineux. L'existence de ce segment obscur est confirmée par l'observation de Gisler qui dit qu'en Suède, sur les hautes montagnes, le voyageur est quelquefois enveloppé subitement d'un brouillard très-transparent, d'un gris blanchâtre passant un peu au vert, qui s'élève du sol et se transforme en aurore boréale.

Les cirro-cumulus et les brumes deviennent lumineuses quand elles sont traversées par des décharges électriques suffisamment énergiques, et quand la lumière du jour n'est plus là pour effacer leur lueur plus faible. Toutefois, il peut arriver quelquefois qu'on les aperçoive même de jour; ainsi M. Arago établit d'une manière péremptoire que le docteur Henri Ussher ne s'est point trompé dans une notice publiée dans le tome II des *Mémoires de l'Académie d'Irlande*, quand il décrit une aurore boréale vue en plein jour, à midi, le 24 mai 1778. Cet observateur, dans le jour qui suivit une nuit où il avait observé une brillante aurore boréale, ayant trouvé que les astres oscillaient beaucoup dans sa lunette, aperçut dans le ciel des rayons d'une lumière blanche et vacillante, qui s'élevaient de tous les points de l'horizon vers le pôle de l'aiguille d'inclinaison, où ils formaient une coupole légère et blanchâtre semblable à celle que présentent la nuit les plus brillantes aurores boréales. M. Arago a constaté, en consultant les anciens registres de l'Observatoire, les perturbations considérables qu'éprouva au même moment l'aiguille des variations diurnes, preuve que le phénomène observé par le docteur Ussher était bien une aurore boréale de jour.

On trouve également dans la relation de M. de Tessan, du voyage de la *Vénus*, que M. Cornulier, officier très-instruit de la marine royale, a souvent observé dans les parages de Terre-Neuve une direction particulière qu'affectent de jour les cirrus, qui annonce toujours pour la nuit une belle aurore boréale [1]. M. Cornulier, d'accord avec M. Verdier, est convaincu, en étudiant la disposition de ces cirrus, qu'il y a presque tous les jours des aurores boréales dans ces parages, et que leur éclat seul est variable; il croit que, si on ne les observe pas toutes, cela tient à ce que la brume et les nuages des couches inférieures en masquent la vue. Cette remarque est tout à fait

[1] Il n'y a aucun doute que la direction qu'affectent les cirrus, surtout vers les régions polaires, ne soit due à l'électricité qu'ils transmettent; transmission qui pourrait également expliquer la phosphorescence qu'ils manifestent quelquefois.

d'accord avec les observations d'aurores boréales qui sont faites maintenant depuis quatre ans d'une manière très-soignée, dans l'hémisphère septentrional, au Canada en particulier. M. Lefroy a enregistré à l'Observatoire magnétique de Toronto les observations d'aurores boréales qui sont faites sous sa direction, dans différentes stations au nombre de treize, non comprises d'autres observations fort nombreuses faites aux États-Unis, et qui sont recueillies par le professeur Henry, secrétaire de la *Smithsonian Institution*. Il résulte de tout cet ensemble d'observations que l'aurore boréale apparaît dans presque toutes les nuits claires, et dans lesquelles la pleine lune ne brille pas d'un éclat trop grand; mais elle ne se montre pas à la fois dans toutes les stations. Cela est vrai surtout pour les mois dont les jours sont les plus longs. D'octobre en mars, on peut dire que dans ces mois il n'y a presque pas une nuit où l'on n'aperçoive une aurore boréale; mais c'est en février qu'elles sont les plus brillantes. Il résulte des tableaux qui donnent le nombre des aurores aperçues dans chaque mois de l'année, qu'on en a vu en tout pendant 261 nuits en 1850, et pendant 207 en 1851. Une chose assez remarquable, mais assez naturelle cependant, c'est que la proportion des nuits dans lesquelles on voit l'aurore est d'autant plus grande qu'on est plus rapproché du pôle magnétique.

Revenant à la coexistence des particules glacées dans l'air avec les aurores, nous en trouvons une preuve frappante dans les observations faites au Canada et aux États-Unis. Des registres d'observations météorologiques, tenus avec beaucoup de soin, indiquent l'état de l'atmosphère les jours qui précèdent et qui suivent l'apparition d'aurores boréales. Or, presque toujours, l'aurore est précédée de la chute de la pluie et surtout de la neige; il arrive aussi très-souvent, mais non toujours, que cette chute a lieu après l'aurore. Enfin l'apparition des halos lunaires, qui précède le plus souvent celle des aurores boréales, est une preuve de la présence dans l'atmosphère de ces particules glacées qui forment le réseau illuminé par la transmission de l'électricité.

Mais, de toutes les preuves en faveur de l'origine électrique

de l'aurore boréale, la plus concluante est celle qui est tirée de l'action que l'apparition de ce phénomène exerce sur l'aiguille aimantée. Si nous examinons avec attention toutes les observations qui ont été faites sur les perturbations que l'aurore boréale détermine dans l'aiguille des variations diurnes, soit par M. Arago, à l'Observatoire de Paris, soit par M. Forster, par Farquharson et par tous les voyageurs, nous pouvons en tirer les résultats suivants :

1° Dans la journée qui précède la nuit où doit apparaître une aurore boréale, la déclinaison de l'aiguille à l'ouest est toujours sensiblement augmentée de 10, 20, 30 minutes, et même plus.

2° Au milieu et à la fin de l'apparition, l'aiguille dévie au contraire plus à l'est qu'elle ne devrait le faire dans son état normal.

3° Enfin l'aiguille éprouve, souvent pendant la période du phénomène de l'aurore boréale, des oscillations irrégulières dont l'amplitude peut être de quelques minutes de degrés.

Il arrive ordinairement que, pour les aurores boréales qui se montrent dans la soirée, c'est à midi ou à une heure après midi que l'aiguille de déclinaison présente son maximum de déviation à l'ouest; la perturbation peut faire dévier l'aiguille de 5 à 30 minutes et au delà, de plus qu'elle ne déviait à la même heure les jours suivants et précédents. Quelquefois c'est à d'autres heures, le matin, par exemple, que le maximum de déviation occidentale a lieu; il est probable que cela tient à l'apparition d'une aurore boréale de jour. M. Arago en cite plusieurs cas; ainsi, le 17 août 1825, la déclinaison fut, de 8 heures et demie du matin à midi, constamment supérieure de 5′ à la moyenne du mois pour les mêmes heures; et le même jour, à 10 heures du soir, MM. Coldstream et Foggo apercevaient de faibles traces d'aurore boréale, qui étaient très-probablement la fin d'une aurore boréale de jour. Le soir, l'aiguille était revenue à sa position ordinaire.

Les observations magnétiques faites dans les régions voisines du pôle confirment l'influence considérable exercée sur l'aiguille de déclinaison par l'aurore boréale. Ainsi à Reykinwik

(64° 8′ 15″ de lat. nord), MM. Lottin et Bravais ayant fait de nombreuses observations sur les variations diurnes de la déclinaison comparativement avec des observations semblables faites à Paris et à Cherbourg, ils avaient été frappés des perturbations presque continuelles de l'aiguille, qu'ils avaient attribuées à quelques mouvements du sol. Puis, remarquant la concordance de leurs observations avec celles faites cinquante ans auparavant (en 1786), par M. Lowenorn, ils acquirent la conviction que cette marche irrégulière de l'aiguille était due à des aurores invisibles pour eux à cause de la longue présence du soleil sur l'horizon. M. Ginge, missionnaire danois, avait fait, en 1786 et 1787, quelques observations sur l'aiguille aimantée, qui l'avaient amené à reconnaître que, dans le courant de vingt-quatre heures, la déclinaison se trouve ordinairement la plus forte, vers l'ouest, de 9 à 10 heures du soir, et la plus faible de 9 à 10 heures du matin, ce qu'il n'hésite pas d'attribuer aux aurores boréales. MM. Lottin et Bravais confirment complétement cette conclusion, qui résulte de leurs nombreuses et excellentes observations.

Nous voyons donc que les observations magnétiques faites dans les régions voisines du pôle avaient déjà, depuis longtemps, semblé indiquer que les aurores boréales doivent être beaucoup plus fréquentes qu'on ne pense; ce qui vient d'être confirmé d'une manière directe par les apparitions d'aurores boréales signalées dans les stations du Canada et des États-Unis.

Ainsi, la production des aurores aux pôles boréal et austral serait l'état normal sous lequel se manifesterait la neutralisation de l'électricité positive de l'atmosphère avec la négative restée dans le globe terrestre. Cette neutralisation ne se ferait pas d'une manière parfaitement régulière et uniforme. Il est évident que, suivant l'état plus ou moins brumeux, et par conséquent plus ou moins conducteur de l'atmosphère aux régions polaires, les deux électricités devraient se neutraliser avec plus ou moins de facilité. Ces différences seraient accusées par des déviations plus ou moins grandes de l'aiguille de déclinaison, et par leur irrégularité même, différences qui ne seraient sensibles à de grandes distances des pôles, par exemple dans

la zone tempérée, qu'autant qu'elles seraient très-considérables. La plus grande déviation à l'ouest, qui aux latitudes peu élevées, précède généralement l'apparition d'une aurore, indiquerait une grande accumulation d'électricité due à une forte condensation de vapeurs aux régions polaires, laquelle, en facilitant la réunion des deux principes électriques, augmenterait l'intensité du courant terrestre dirigé du nord à l'équateur dans notre hémisphère, et porterait par conséquent l'aiguille plus à l'ouest. Une fois l'aurore visible, ce courant deviendrait moins fort, parce que la lumière même de l'aurore serait une preuve de la résistance plus grande que rencontre la réunion des deux électricités, à cause probablement de la congélation des particules d'eau suspendues dans l'air qui constituent la brume[1]; aussi l'aiguille devrait rétrograder à l'est, ce qui a effectivement lieu.

Dans les latitudes plus élevées, les perturbations de l'aiguille sont continuelles, parce que les plus légères différences dans l'intensité des décharges électriques qui ont lieu aux régions polaires doivent y être sensibles. Quant à la remarque de MM. Ginge, Lowenorn et Lottin, que le maximum de déviation de l'aiguille a lieu de huit à dix heures du soir, et le minimum de neuf à dix heures du matin, comme elle est le résultat d'observations faites seulement pendant quelques semaines de l'été, elle prouve simplement qu'à cette époque de l'année, c'est-à-dire à l'époque où les jours sont les plus longs, la plus grande condensation d'humidité a lieu, ainsi que cela doit être, dans les moments qui précèdent et dans ceux qui suivent le coucher du soleil, et la moindre sept à huit heures après son lever. Du reste, d'après les observations du lieutenant Hood, consignées dans le voyage du capitaine Franklin, du 1er février au 31 mai, la plus grande déclinaison avait lieu entre huit et neuf heures du matin, et la moindre à une heure après minuit. Ainsi, comme on le voit, les époques des *maxima* et des *minima* de

[1] Il est clair que la brume, quand elle commence à se former, doit être meilleure conductrice que lorsque, plus tard, elle finit par ne se composer peu à peu que de particules glacées.

déclinaison sont éminemment variables avec les saisons dans les latitudes élevées, où les grandes différences dans la longueur des jours et dans la température, doivent amener des perturbations considérables dans l'état de l'atmosphère, au point de vue de la conductibilité électrique.

Un fait assez curieux, c'est qu'il arrive quelquefois que lorsque l'observateur se trouve, pour ainsi dire, au milieu de l'aurore boréale, l'action sur l'aiguille peut devenir presque nulle. C'est ce que M. Forster a remarqué au Port-Bowen, situé plus au nord que 65° qui est la latitude des forts Franklin et Entreprise, où le docteur Richardson avait par contre remarqué l'action de l'aurore sur l'aiguille. En effet, si l'aiguille est située dans l'intérieur du cercle que forme l'aurore boréale autour du pôle magnétique, elle n'est plus sous l'influence immédiate des courants électriques qui circulent alors autour d'elle, et non au-dessous ou au-dessus, et elle ne doit en éprouver qu'une action variable et irrégulière.

L'action magnétique de l'aurore boréale n'est pas limitée à l'aiguille de déclinaison. Il résulte des nombreuses observations de M. Kreil que cette action s'exerce également sur les trois éléments magnétiques. Elle augmente légèrement l'inclinaison comme la déclinaison, mais moins fortement au commencement de l'apparition du phénomène, et elle diminue l'intensité, preuve que la cause quelconque qui produit l'aurore n'est pas la même que celle qui engendre le magnétisme terrestre, et en est indépendante.

Nous avons dit que l'aurore boréale était probablement un phénomène journalier, mais seulement d'une intensité variable; ces différences dans son intensité seraient la cause qui fait qu'elle n'est pas toujours perceptible, et que le nombre de fois qu'elle est apparente dans l'année est d'autant moindre qu'on est plus éloigné des régions polaires.

Il y a aussi de très-grandes différences entre les mois de l'année, quant au nombre des aurores boréales visibles d'un même lieu. Ces différences ressortent d'une manière frappante de deux tableaux qui comprennent le nombre des aurores boréales observées chaque mois pendant un certain nombre

d'années ; le premier, donné par M. Hansteen, pour Christiana, pendant une période de seize années, de 1837 à 1853 ; l'autre, donné par M. Quetelet, d'après des observations faites à Upsal, de 1739 à 1762, successivement par Celsius, Hjorter et le professeur Bergmann [1].

NOMBRE DE JOURS PENDANT LESQUELS L'AURORE BORÉALE S'EST MONTRÉE A CHRISTIANIA, DEPUIS JUILLET 1837 JUSQU'EN JUIN 1853 [2].

PÉRIODES.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	SOMME.
1837-38	0	4	9	4	3	2	0	5	3	4	0	0	34
1838-39	0	1	5	3	5	2	6	4	3	5	1	0	35
1839-40	0	0	1	4	4	2	6	6	11	3	0	0	37
1840-41	0	2	2	2	1	7	6	0	2	3	0	0	25
1841-42	0	2	3	4	11	4	2	5	5	13	0	0	49
1842-43	0	4	4	7	4	5	6	8	11	1	0	0	50
1843-44	0	0	7	4	0	1	3	1	6	1	0	0	23
1844-45	0	2	3	3	3	0	0	2	3	1	0	0	17
1845-46	0	6	1	2	3	0	0	0	3	3	1	0	19
1846-47	0	8	12	4	3	5	2	1	5	6	0	0	46
1847-48	0	1	4	10	4	5	4	4	1	6	0	0	39
1848-49	0	5	4	5	4	5	5	7	6	5	0	0	46
1849-50	1	0	3	6	4	5	3	3	6	1	1	0	33
1850-51	0	0	6	3	0	2	1	4	1	0	0	0	17
1851-52	0	0	3	2	2	4	1	8	7	6	0	0	33
1852-53	0	0	11	2	4	6	1	3	2	2	0	0	31
Somme.	1	35	78	65	55	55	46	61	65	60	3	0	534
Rapport en supposant 1000 aurores boréales par an.	2	65,5	146	122	103	103	86	114	140,5	112,5	5,5	0	1000

[1] Il existe même dans l'ouvrage de Mairan, *de l'Aurore boréale*, un tableau des années antérieures à 1739 qui, quoique probablement fort incomplet, donne des résultats semblables à ceux des deux tableaux plus complets que nous insérons.

[2] Jusqu'en août 1846, les observations se terminaient ordinairement à onze heures ; néanmoins elles ont été continuées pendant toute la nuit, depuis novembre 1841 jusqu'en juin 1843. Dans la période du 15 août 1846 à la même date de 1847, les observations furent faites par cinq observateurs à chaque heure

NOMBRE DE JOURS PENDANT LESQUELS L'AURORE BORÉALE S'EST MONTRÉE A UPSAL DANS LES ANNÉES 1739 A 1756, ET 1759 A 1762.

ANNÉE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	SOMME.
1739	2	3	7	5	0	0	2	7	6	9	2	2	45
1740	3	8	4	0	1	1	0	3	4	8	2	2	36
1741	11	5	9	3	0	0	4	15	9	10	6	4	76
1742	5	4	5	2	0	0	1	8	9	7	2	3	46
1743	1	6	8	4	1	0	0	6	10	11	3	4	47
1744	1	3	1	1	4	0	0	0	1	1	3	3	18
1745[1]	3	6									3	7	
1746	5	10	3	1	0	0	1	0	6	14	3	8	56
1747	3	4	7	0	0	0	0	4	4	4	4	3	33
1748	1	5	7	0	0	0	0	5	7	2	6	6	39
1749	3	4	9	1	0	0	0	4	3	3	2	4	33
1750	3	6	4	0	0	0	1	4	1	4	0	1	24
1751	0	0	3	0	0	0	0	0	3	9	5	4	24
1752	8	9	6	0	0	0	0	1	5	6	4	0	39
1753	0	3	10	8	0	0	0	2	0	0	1	5	29
1754	1	2	5	2	0	0	0	0	1	2	3	1	17
1755	0	2	0	0	0	0	0	0	1	3	2	1	9
1756	1	2	1	2	0	0	0	0	6	3	0	0	15
1759	3	6	4	1	0	0	0	4	11	1	9	12	48
1760	6	9	5	7	0	0	1	3	0	8	9	5	53
1761	9	12	8	8	1	0	0	3	5	2	4	1	50
1762	0	0	3	5	0	0	0	2	8	4	4	8	34
Somme.	66	105	106	50	7	1	10	71	100	111	79	77	783
Rapport en supposant 1000 aurores boréales par an.	84	134	135	64	9	1	13	91	128	142	101	98	1000

Il semble résulter de ces tableaux que le phénomène des aurores boréales affecte une périodicité annuelle et présente deux

de jour et de nuit ; les descriptions détaillées ont été faites par M. Fearnley, adjoint à l'Observatoire, et par M. Hansteen lui-même. Dans les années suivantes, l'état du ciel a été noté seulement pour les cinq heures ordinaires 2, 4, 10 et 21 heures.

[1] Les observations de l'année 1745 ne sont pas comprises dans les sommes vu qu'elles sont incomplètes.

maxima très-prononcés aux époques des deux équinoxes, et deux *minima* aux époques des solstices. Le minimum du solstice d'été est même si prononcé que, pendant les 16 années qu'embrassent les observations de M. Hansteen du premier tableau, on n'a pas constaté la présence d'une seule aurore boréale au mois de juin, et que pendant les vingt-trois années du second tableau, une seule aurore a été observée dans ce même mois.

Ces différences dans le nombre des aurores boréales visibles dans chaque mois tiennent à deux causes, d'abord à ce que, dans les mois où les nuits sont les plus courtes, tels que mai, juin et juillet, on doit en apercevoir beaucoup moins, lors même qu'il y en aurait autant que dans les autres, ensuite à ce qu'il y a évidemment des mois où les aurores sont plus fortes, puisqu'on en voit davantage en mars, septembre et octobre que dans les mois mêmes où les jours sont les plus courts. Cette influence des deux équinoxes est facile à comprendre d'après notre théorie; en effet, quand le soleil, au printemps, se rapproche de notre hémisphère, la quantité de vapeurs qui s'élèvent de la mer pour être portées par le courant tropical vers le pôle boréal, augmente naturellement beaucoup; et, comme en mars et avril, l'atmosphère des régions boréales n'est point encore réchauffée par le soleil, ces vapeurs s'y condensent facilement, ce qui n'a plus lieu au même degré dans les mois de mai, de juin et de juillet. Mais quand le soleil s'éloigne de ces régions, et en particulier à l'équinoxe d'automne, toutes les vapeurs accumulées pendant les mois de l'été qui ont précédé éprouvent de nouveau successivement une forte condensation; et la condensation près des pôles, des vapeurs fortement chargées d'électricité positive dont l'atmosphère est remplie, est, comme nous l'avons vu, la cause des aurores boréales. Il est probable qu'une périodicité analogue doit exister pour les aurores australes; mais les observations ne sont pas assez nombreuses pour pouvoir l'établir autrement que par analogie. Cette double périodicité expliquerait la coïncidence assez généralement remarquée entre l'apparition des aurores boréales et celle des aurores australes. En effet, le passage du soleil à

chacun des équinoxes, étant pour le même hémisphère, les deux moments de l'année, où par une cause différente, les décharges électriques autour du pôle doivent être les plus abondantes, il est évident que l'autre hémisphère en éprouvera le même effet. Seulement, tandis qu'à l'équinoxe d'automne ce sera pour l'hémisphère boréal, comme à l'équinoxe de printemps pour l'hémisphère austral, la condensation des vapeurs accumulées dans les mois précédents qui facilitera l'écoulement de l'électricité, ce sera à l'équinoxe de printemps pour l'hémisphère boréal, comme à celui d'automne pour l'austral, l'arrivée des vapeurs nouvelles dans une atmosphère très-refroidie, qui apportera une grande dose d'électricité.

Mairan avance qu'il y a dans l'apparition des aurores boréales des variations séculaires, c'est-à-dire qu'il y a des époques compreuant un certain nombre d'années pendant lesquelles on voit plus d'aurores et d'autres pendant lesquelles on en voit moins. Il cite en particulier une longue période dans le dix-septième siècle, de 1621 à 1688, où il n'est fait mention d'aucune aurore boréale. Ce physicien, qui regarde l'aurore boréale comme un phénomène cosmique et par conséquent extra-atmosphérique, est disposé à attribuer ces variations à la position variable de la terre par rapport à l'atmosphère solaire dont, suivant lui, les aurores boréales seraient une émanation. Remarquons d'abord que pour bien comparer, sous le rapport de la fréquence des aurores boréales, les époques anciennes à l'époque actuelle, il aurait fallu avoir à ces époques des observateurs aussi nombreux, aussi exacts, et surtout aussi rapprochés des régions polaires qu'on en a maintenant; ce qui n'est pas. Nous ne pouvons donc attribuer une grande portée à la remarque de Mairan; cependant il se pourrait que l'accumulation des glaces dans le voisinage des régions polaires, accumulation constatée par les documents les plus positifs[1], ait dû contribuer à augmenter dans les deux

[1] Il est bien reconnu que les côtes du Groënland, actuellement bordées par le grand banc de glace appelé *la banquise*, étaient autrefois libres et facilement abordables; on est assez généralement disposé à attribuer, comme nous l'avons déjà dit, l'établissement permanent de ces glaces à un soulèvement du fond de

derniers siècles le nombre des aurores boréales. En effet l'aurore boréale n'étant, suivant nous, que l'effet lumineux des décharges électriques qui ont lieu autour des pôles entre le sol et les vapeurs qui y sont portées, il faut pour que cet effet soit produit, que les décharges rencontrent sur leur route des particules glacées, et que par conséquent le sol lui-même soit recouvert de glaces. A l'époque donc où les régions situées autour du pôle magnétique n'étaient pas constamment recouvertes de glaces, où, en particulier, elles étaient la mer elle-même, il devait bien y avoir des décharges électriques, mais des décharges peu ou point lumineuses. Nous concevons donc facilement que le déplacement des glaces polaires, joint à celui du pôle magnétique de la terre, ait pu déterminer momentanément des conditions peu favorables à l'apparition de l'aurore boréale. Une chose assez remarquable, c'est que cette longue période sans aurore boréale coïncide avec l'époque où l'aiguille aimantée était exactement dirigée dans le méridien terrestre (année 1662).

Nous ne nous arrêterons pas à certains autres faits de périodicité qu'on a encore remarqués, tels qu'un retour de l'aurore boréale au même jour de l'année; ainsi on a observé, le 18 octobre 1836 et le 18 octobre 1837, une aurore boréale, et en général on a remarqué que de 1837 à 1850, c'est-à-dire dans 13 années, le phénomène s'était reproduit 14 fois du 12 au 22 octobre. Mais cette fréquence de l'apparition de l'aurore dans les jours dont il s'agit, tient très-probablement à ce que le mois d'octobre est un des mois de l'année où il y a le plus d'aurores boréales; par conséquent la périodicité appartient au mois et non pas au jour; elle s'explique, comme nous avons dit, par l'influence de la position du soleil sur la production et la condensation des vapeurs.

Nous pouvons terminer ce long paragraphe sur les aurores boréales par le résumé suivant :

1° Toutes les observations concourent à démontrer que l'au-

la mer qui les arrête maintenant, au lieu de les laisser flotter comme elles le faisaient quand la mer était plus profonde.

rore boréale est un phénomène ayant son siége dans l'atmosphère, et qui consiste dans la production d'un anneau lumineux ayant pour centre le pôle magnétique, et d'un diamètre plus ou moins grand.

2° L'expérience démontre qu'en opérant dans de l'air raréfié la réunion des deux électricités près du pôle d'un fort aimant artificiel, on produit un petit anneau lumineux semblable à celui qui constitue l'aurore boréale, et animé d'un mouvement de rotation semblable.

3° L'aurore boréale serait due par conséquent à des décharges électriques, s'opérant dans les régions polaires entre l'électricité positive de l'atmosphère et la négative du globe terrestre.

4° Ces décharges électriques ayant lieu constamment, mais avec des intensités variables suivant l'état de l'atmosphère, l'aurore boréale devrait être un phénomène journalier plus ou moins intense, par conséquent visible à de plus ou de moins grandes distances, et seulement quand les nuits sont claires; ce qui est parfaitement d'accord avec l'observation.

5° Les phénomènes qui accompagnent l'aurore boréale, tels que la présence et la forme des cirro-stratus, et surtout ceux qui sont relatifs aux perturbations qu'éprouvent l'aiguille aimantée, sont de nature à démontrer la vérité de l'origine électrique que nous venons d'attribuer à l'aurore; hypothèse avec laquelle ces phénomènes se concilient jusque dans leurs moindres détails.

6° L'aurore australe, ainsi que cela résulte du petit nombre d'obervations dont elle a été l'objet, présente exactement les mêmes phènomènes que la boréale, et s'explique par conséquent de la même manière.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre:

Gauss et *Weber*. — Description des magnétomètres. — *Resultate aus den beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre* 1836, p. 13; et 1837, p. 104. — *Correspondance mathématique de Quetelet* (*troisième série*), t. I (Janv. 1838), p. 41.

Gauss. — Mesure absolue de l'intensité du magnétisme terrestre. — *Inten-*

sitas vis magneticæ, etc., Gottingæ, 1833. — *Annales de ch. et de phys.* T. LVII, p. 5; et *Bibl. univ.* T. XIX (1839), p. 151. — Variations magnétiques. — *Bibl. univ.* T. I (1830), p. 345.

Brooke. — Enregistreurs magnétiques photographiques. — *Phil. trans.* (1847) (*Première partie*), p. 69. — *Idem.* (*Première partie*, 1850), p. 83.

Leverrier. — *Idem.* — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. XLII (Avril 1856), p. 749.

Humboldt. — Variations du magnétisme terrestre à diverses latitudes (*Mémoire* de M. Biot, lu à l'Institut le 26 frimaire an XIII). — Mémoire sur l'intensité et l'inclinaison magnétiques en Suisse et en Italie, avec Gay-Lussac. — *Société d'Arcueil.* T. I, p. 1. — Magnétisme terrestre, aurore boréale. — *Cosmos.* T. I, p. 214. — Lettre au duc de Sussex sur les observations magnétiques. — *Bibl. univ.* T. IV (1836), p. 127. — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. IV, p. 26 et p. 524; t. IX, p. 603.

Hansteen. — Magnétisme terrestre, aurores boréales, etc. — *Bibl. univ.* (1826). T. XXXII, p. 161, et p. 252; t. XXXIII, p. 283; t. XXXVII, p. 275; t. XLII, p. 212; t. XLIX, p. 113; et t. LIV, p. 407. — *Arch. des sc. phys.* T. VII, p. 307; t. XXVIII, p. 136. — Diminution de l'inclinaison. — *Bulletin de l'Acad. de Bruxelles.* T. XX (n° 10).

Kupffer. — Magnétisme terrestre. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXXV, p. 225. — Influence de la température sur les forces magnétiques. — *Idem.* T. XXX, p. 113.

Duperrey. — Observations faites dans le voyage sur *la Coquille* en 1822, 1823, 1824, 1825. — *Annales de ch. et de phys*, t. XXXIV, p. 298, et t. XLV, p. 371.

Forbes. — Intensité du magnétisme terrestre en divers points de l'Europe. — *Transactions de la Société royale d'Édimbourg.* Vol. XIV (1837).

Quetelet. — Intensité magnétique en divers lieux. — *Mémoire de l'Acad. de Bruxelles.* T. VI (1830), et t. XIII (1840). — Magnétisme à Bruxelles. — *Idem.* T. XII (1839). — *Correspondance mathématique, Bulletin de l'Acad. de Bruxelles, et Annuaire de l'Observatoire de Bruxelles. Passim.*

Arago. — Magnétisme terrestre, variations, aurore boréale, etc. — *Annales de ch. et de phys.*, de 1816 à 1840, *passim.* — *Notices scientifiques.* T. I, p. 459, et p. 544.

Sabine. — Observations du magnétisme terrestre. — *Contributions to the terrestrial magnetism.* — *Phil. trans.* 1840-1855, *passim.* — *Bibl. univ.* T. XXIX (1840), p. 162. — Variations des éléments magnétiques à différentes stations. — *Phil. trans.*, et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. VII, p. 210; t. XV, p. 46; t. XVIII, p. 27, 33 et 119; T. XIX, p. 33; T. XXVIII, p. 49. — Sur les lignes isodynamiques. — *Correspondance mathématique de Quetelet* (*troisième série*). T. III, p. 6.

Gay. — Variations diurnes et perturbations à Valdivia. — *Bibl. univ.* T. I. (1836), p. 349. — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. I, p. 147; t. II, p. 330; t. V, p. 704; t. VI, p. 833.

Lamont. — Mouvement diurne de l'aiguille (période décennale). — *Bulletin de l'Acad. de Bruxelles.* T. XIII (n° 6). — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XIX, p. 306; t. XXI, p. 130 et 212.

Barlow. — Variations diurnes de l'aiguille aimantée. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXIII, p. 415.

Plantamour. — Variations diurnes à Genève. — *Arch. de l'élect.* T. IV, p. 620.

Aimé. — Variations diurnes à Alger, etc. — *Annales de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. X, p. 223; et t. XVII, p. 217.

Bravais. — Intensité du magnétisme. — *Annales de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XVIII, p. 206. — Sur les aurores boréales. — 1 vol. in-8, 1846, Extrait du *Voyage en Scandinavie.*

Bravais et Lottin. — Variations diurnes de la déclinaison à Bossekop. — *Voyages en Scandinavie, en Laponie,* etc. — Aurore boréale. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. III, p. 304.

Necker. — Rapports entre la direction de la stratification et les lignes d'égale intensité magnétique. — *Bibl. univ.* (1830). T. XLIII, p. 166. — Aurores boréales à l'île de Sky. — *Annales de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. I, p. 270.

Secchi. — Causes des variations périodiques du magnétisme terrestre. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVII, p. 192; et t. XXVIII, p. 139. — Perturbations magnétiques pendant l'aurore boréale. — *Idem.* T. XXV, p. 162.

Kreil. — Perturbations magnétiques, périodicité, influence de l'aurore, etc. — *Bibl. univ.* T. VIII, p. 114; t. X (1837), p. 293; t. XII (1837), p. 205 et 408. — *Bulletin de l'Acad. de Bruxelles,* etc.

Richardson et *Hood.* — Aurore boréale. — *Bibl. univ.* T. XXIII (1823), p. 182; t. XL (1829), p. 110.

Bessel. — Aurore boréale. — *Bibl. univ.* T. VI (1836), p. 137.

Wartmann. — Périodicité des aurores boréales. — *Bibl. univ.* T. XXVII (1840) p. 208.

De la Rive. — Observation de différentes aurores boréales. — *Bibl. univ.* T. II (1837), p. 387 et 311; et t. VII (1837), p. 409. — Origine des aurores. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 118; et t. XXIV, p. 337.

Mortet. — Aurores boréales. — *Annales de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXVII, p. 65.

Olmsted. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 112.

Liais. — Hauteur des aurores boréales, etc. — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. XXXIII, p. 302; et t. XXXVII, p. 746.

Matteucci. — Influence de l'aurore sur les télégraphes. — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. XXVII, p. 585.

Highton. — *Idem.* — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. XXVIII, p. 46; et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) t. X, p. 121.

Macquorn-Rankine. — Lumière de l'aurore non polarisée. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXI, p. 396.

SEPTIÈME PARTIE

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

APPLICATIONS PHYSIQUES.

§ 1. Application de l'électricité à la production de la lumière et de la chaleur.

Les applications de l'électricité, longtemps réduites à quelques essais thérapeutiques et à des recherches purement scientifiques en chimie, ont pris depuis quinze à vingt ans un immense développement, et sont destinées probablement à s'étendre encore beaucoup. Nous les avons classées dans trois grandes divisions fondées, non sur leur propre nature, mais sur la nature des propriétés de l'électricité. Nous suivrons dans leur étude le même ordre que nous avons suivi dans l'examen des propriétés elles-mêmes qui ont fait l'objet de la 4e partie (2e volume). Ainsi, nous nous occuperons d'abord des applications fondées sur les propriétés physiques de l'électricité, savoir sur la faculté que possède l'électricité en mouvement de produire de la lumière et de la chaleur, et d'exercer une action électro-magnétique. Puis viendront les applications chimiques dans lesquelles c'est la propriété du courant d'agir chimiquement sur le corps qu'il traverse, qui est mise à contribution. Enfin nous terminerons par les applications physiologiques qui consistent à utiliser pour l'art de guérir les effets physiologiques si remarquables que peut produire l'électricité.

Nous commencerons, dans ce premier chapitre, consacré aux applications physiques, par celle qui a pour objet la production de la lumière et de la chaleur.

Nous avons vu que l'électricité en mouvement peut produire beaucoup de chaleur et beaucoup de lumière; nous avons analysé les lois de cette production en même temps que nous avons étudié les propriétés particulières de cette lumière et de cette chaleur. Nous avons décrit un appareil destiné à donner plus de fixité qu'elle n'en a naturellement à la lumière qui jaillit entre deux pointes de charbon communiquant respectivement avec les deux pôles d'une pile [1]. Cet appareil est celui de M. Jules Duboscq; mais il est juste de reconnaître que la première idée de ces appareils appartient à MM. Staite et Petrie, qui en ont construit, en 1848, à peu près en même temps que M. Foucault en construisait de son côté en France. Ce n'est qu'après ces premiers essais que MM. Breton frères, M. Duboscq, M. Martin de Brette et M. Liais ont successivement imaginé aussi des appareils fondés sur le même principe, mais avec quelques modifications dans les détails.

Le plus simple de ces appareils est celui de M. Staite, surtout depuis les modifications que lui a apportées M. Archereau. Deux colonnes ou tiges métalliques, auxquelles on peut donner les formes que l'on veut, sont unies entre elles par trois traverses, de manière à former un ensemble solide; l'une de ces traverses est métallique, c'est celle qui occupe la partie supérieure de l'appareil; les autres doivent être en bois. Ces dernières servent de supports et de points d'attache à une longue bobine placée parallèlement entre les deux colonnes, et qui doit être faite d'un fil assez gros pour que le courant, en la traversant sans la fondre, puisse agir sur une tige de fer doux placée à l'intérieur de la bobine. Cette tige de fer est soudée à une tige de cuivre de même calibre et de même longueur, portant à son extrémité libre une petite poulie. Du côté opposé le fer porte un petit tube de cuivre, avec vis de pression, dans lequel on introduit l'un des charbons, lorsque la tige entière a été placée dans l'intérieur de la bobine. Alors, une corde, fixée à la traverse inférieure, et s'enroulant sur une poulie d'un grand diamètre, peut servir de support à la tige mobile de fer, en s'enga-

[1] Voyez tome II, page 267, figure 220.

geant dans la gorge de la petite poulie. Il suffit pour cela qu'un contre-poids, placé au bout de la corde, soit susceptible de lui faire équilibre.

La traverse métallique, qui occupe la partie supérieure de l'appareil, porte un petit tube de cuivre qui descend perpendiculairement en face du charbon que porte la tige électro-aimant, et dans laquelle on introduit également un crayon de charbon. Au moyen d'un ajustement très-simple, ce tube peut d'ailleurs être réglé facilement, tant pour sa hauteur que pour sa direction, et, par conséquent, les deux charbons peuvent être placés très-exactement l'un au-dessus de l'autre.

Ainsi disposé, l'appareil peut fonctionner, mais il est important de le régler, et, surtout, de bien équilibrer la tige mobile. Cela étant fait, il suffit de mettre en rapport une des deux colonnes métalliques de l'appareil avec l'un des pôles de la pile, et de faire aboutir l'autre pôle au fil de cuivre de la bobine (dont un bout est soudé sur son canon). Le courant passe alors de la bobine au charbon inférieur par la tige elle-même qui le supporte, et, franchissant l'intervalle séparant les deux charbons, il arrive à l'autre pôle de la pile par la traverse supérieure de l'appareil et la colonne métallique à laquelle est attaché l'un des fils conducteurs.

Tant que le courant passe et produit la lumière, la bobine réagit sur le fer de la tige électro-aimant, qui porte le charbon inférieur, et l'attire en raison de la réaction magnétique qu'exercent les solénoïdes sur un fer mobile à leur intérieur. C'est ce qui donne aux charbons l'*écart suffisant* pour l'effet lumineux. Mais, aussitôt que le courant cesse de passer, ou s'affaiblit par suite de l'usure des charbons, cette attraction cesse, et le charbon mobile, sollicité par le contre-poids, se trouve entraîné et soulevé jusqu'à ce que le courant passe de nouveau, alors l'équilibre se trouve établi entre les deux forces, et les charbons peuvent s'user de nouveau. Ainsi, à mesure que la lumière tend à décroître, le contre-poids réagit, et c'est ce qui maintient toujours égale l'intensité de la lumière.

Plusieurs précautions néanmoins doivent être prises quand on veut que l'appareil marche très-régulièrement. Il faut d'a-

bord placer les charbons à une hauteur qui dépend de l'intensité de la pile dont on doit se servir. Si la pile est très-forte, les charbons doivent être placés un peu haut, car l'attraction des solénoïdes augmente, du moins jusqu'à moitié de leur longueur, à mesure que le fer s'y enfonce. Au contraire, et par la même raison, les charbons doivent être placés plus bas si la pile est faible. D'un autre côté, comme la pile elle-même s'affaiblit, on doit avoir soin d'alléger de temps en temps le contre-poids, afin de maintenir l'équilibre; c'est pourquoi on emploie dans ce cas, comme contre-poids, de la grenaille de plomb.

L'inconvénient de l'appareil précédent, qui a du reste l'avantage d'être très-simple, et, par conséquent, moins susceptible de se déranger, est que le point lumineux se déplace à mesure que les charbons s'usent. Or, il importe, dans beaucoup de circonstances, et particulièrement dans l'application de la lumière électrique aux expérieuces d'optique, que ce point lumineux reste fixe; condition d'autant plus difficile à remplir que les charbons s'usent inégalement. C'est à des moyens mécaniques qu'il faut avoir recours pour obtenir le résultat désiré. Ces moyens sont tous fondés sur l'emploi d'un rouage d'horlogerie mu par des ressorts ou par des poids, qui donne aux charbons le mouvement nécessaire pour les rapprocher l'un de l'autre, dès qu'à cause de leur trop grand écartement, le courant, ne passant plus, la lumière cesse d'être produite. Or, l'appareil est combiné de façon que ce même courant traverse le fil qui entoure un électro-aimant, dont l'énergie varie avec l'intensité du courant; cet électro-aimant agit sur un fer doux, sollicité d'autre part à s'en éloigner par un ressort antagoniste. Sur ce fer doux mobile est montée la détente qui enraye le rouage ou le laisse défiler à propos; et le sens du mouvement de la détente est tel qu'elle presse sur le rouage quand le courant se renforce, et qu'elle le délivre quand le courant s'affaiblit. Or, comme précisément le courant se renforce ou s'affaiblit quand la distance entre les charbons diminue ou augmente, on comprend que les charbons acquièrent la propriété de se rapprocher au moment même où leur distance vient à s'accroître, et que ce rapprochement ne peut aller jusqu'au contact, parce que l'ai-

mantation croissante qui en résulte leur oppose bientôt un obstacle insurmontable, lequel disparaît de lui-même aussitôt que la distance interpolaire s'est accrue de nouveau. Le rapprochement des charbons est donc intermittent; mais quand l'appareil est bien réglé, les périodes de repos et d'avancement se succèdent assez rapidement pour qu'elles équivalent à un mouvement de progression continu.

L'appareil que nous venons de décrire est celui de M. Foucault; celui de MM. Breton n'en diffère qu'en ce qu'au lieu de ressorts pour rapprocher les charbons on s'est servi des poids et contre-poids des bras métalliques qui les portent; et, qu'au lieu d'une détente à pression pour maintenir l'écartement, on a fait intervenir un encliquetage de roue à rochet dentée très-fin. Ce sont des leviers qui agissent sur les porte-charbons; et, par conséquent, c'est par la différence de leur longueur que s'opère l'inégalité dans la marche des deux charbons.

Dans l'appareil de M. Duboscq, que nous avons déjà décrit dans la quatrième partie de ce Traité, le mécanisme, comme nous l'avons vu, est combiné de façon que le charbon positif soit animé d'un mouvement plus rapide que le négatif, pour satisfaire à l'usure plus grande qu'il éprouve de la part du courant. Ce mécanisme est assez compliqué; mais, cependant, en ayant soin de le régler convenablement dans chaque expérience, c'est-à-dire de donner aux ressorts antagonistes de la détente le degré de tension convenable, et à la poulie de diamètre variable, le diamètre voulu pour que le rapprochement des charbons soit le plus régulier possible, on réussit à obtenir une lumière d'une régularité et d'une fixité remarquables.

M. Martin de Brette a imaginé d'ajouter au régulateur de la lumière électrique un appareil amplificateur à rotation, qui permet de projeter d'une manière continue, et dans toutes les directions, à plusieurs kilomètres de distance, une lumière excessivement brillante. Cet appareil renferme six lentilles de phare montées sur une roue en fonte, laquelle est ajustée sur un cadre aussi en fonte, mobile comme la roue elle-même. Au moyen d'un mécanisme particulier, un mouvement est imprimé d'abord au cadre, ensuite au système des lentilles, et ce double

mouvement, convenablement calculé, suffit pour diriger un faisceau lumineux successivement dans différents points de l'espace, et les éclairer d'une manière continue. Il suffit, pour cela, que les lentilles passent dix fois par seconde dans une même direction; pour obtenir ce résultat, il faut que la roue qui porte les lentilles fasse environ deux tours par seconde, tandis que le cadre qui la porte en accomplit cinq. Quant au régulateur lui-même, qu'emploie M. Martin de Brette, il diffère des autres en quelques points peu importants sur lesquels il est inutile de nous arrêter.

Nous nous bornerons encore à signaler le système d'éclairage électrique proposé par M. Liais, dans lequel, pour obtenir une lumière plus régulière et surtout moins saccadée, le régulateur agirait d'une manière constante et indépendante des charbons. Un commutateur mu, soit par un moteur électrique, soit par un mouvement d'horlogerie, serait appliqué à l'appareil afin de rendre, en renversant à des intervalles très-rapprochés le sens du courant, l'usure des charbons aussi égale que possible; puis ce même commutateur conduirait le courant alternativement dans un double système de charbons, qui composerait le foyer lumineux. Il en résulterait que pendant le temps du changement du courant, les charbons pourraient être sans cesse rapprochés au contact, puis écartés d'une quantité constante par le mécanisme moteur, et cette quantité pourrait être réglée suivant l'intensité de la pile que l'on voudrait employer. Enfin l'ensemble de l'appareil serait animé d'un mouvement de rotation rapide pour dissimuler le passage du courant de l'un à l'autre système de charbons. M. Liais propose encore de placer les charbons eux-mêmes dans un globe de verre rempli d'un gaz impropre à la combustion, afin d'en rendre l'usure moins prompte ; procédé que j'avais déjà indiqué en 1846 à l'occasion de l'annonce que j'avais faite d'un appareil propre à l'éclairage des mines.

La lumière électrique, quoique supérieure à toutes les autres lumières artificielles par son éclat et son rayonnement, qui lui donnent l'apparence de la lumière solaire, a un effet bleuâtre assez désagréable à l'œil qu'on peut rendre rosé, il est vrai, en

employant pour construire les pointes entre lesquelles l'arc électrique doit jaillir des charbons de bois de *bourden*. Toutefois cette lumière serait trop éblouissante et trop peu favorable aux objets éclairés pour être employée avec avantage pour l'éclairage ordinaire, lors même que son prix de revient ne la ferait pas repousser. Elle n'est donc utile que dans des cas exceptionnels. Ainsi on peut s'en servir avec avantage pour l'éclairage des phares, pour se procurer une lumière artificielle destinée, à défaut de la lumière solaire, à reproduire de manière qu'elles soient visibles pour plusieurs personnes à la fois, les principales expériences d'optique, comme le fait avec le plus grand succès M. Duboscq. M. Foucault avait déjà, conjointement avec M. Donné, employé cette lumière à éclairer plusieurs microscopes destinés à des démonstrations dans un cours public. On s'en sert encore avec succès pour l'éclairage des travaux de nuit dans les grandes entreprises de terrassements ou de maçonnerie, et pour les effets de décor dans les représentations théâtrales. Au moyen de fils de cuivre recouverts de gutta-percha, on peut conduire le courant dans l'eau jusqu'à de grandes profondeurs, et produire un éclairage applicable à des travaux sous-marins, principalement quand il s'agit d'explorations au fond de la mer ou de sauvetage d'objets submergés. Les pointes de charbon peuvent être renfermées dans un ballon de verre à l'abri du contact de l'eau, ou être plongées dans l'eau elle-même, car, comme nous l'avons vu, la lumière électrique jaillit même dans ce cas, entre les deux pointes; seulement l'arc est moins long. On a proposé dernièrement de se servir de ce mode d'éclairage pour porter dans l'eau une lumière destinée à la pêche des poissons.

Mais de toutes les applications de la lumière électrique, celle qui présente le plus d'intérêt est l'éclairage des mines. Tout le monde sait le danger que courent les mineurs par l'effet du feu *grisou*, c'est-à-dire de l'explosion qui a lieu quand un jet de gaz hydrogène carboné venant à se faire jour à travers les différentes couches, rencontre la flamme des lampes qui éclairent les galeries de la mine. Or, comme la lumière électrique n'a point besoin d'oxygène ni d'aucun gaz pour se produire, puis-

qu'elle a lieu sans combustion, on peut renfermer les pointes de charbon dans un globe hermétiquement clos, et alors il n'y a plus à craindre le moindre danger, le foyer lumineux étant complétement isolé de l'air extérieur. La première idée de cette application appartient à M. Louyet et à M. Boussingault; ce dernier physicien l'a fait connaître à la suite de quelques recherches sur la lampe de Davy, où il montre que la sécurité que présente cette lampe, quoique très-grande, n'est pas absolue, puisqu'un courant de gaz hydrogène animé d'une certaine vitesse, et probablement d'autres causes encore indéterminées, peuvent anéantir momentanément l'efficacité de l'enveloppe protectrice, et faire naître des accidents que l'on est peut-être trop disposé à attribuer, dans toutes les circonstances, à l'imprudence des ouvriers ou à l'imperfection des appareils. M. Boussingault propose une pile fixe, munie de longs conducteurs qui permettent de porter le courant, et par conséquent la lumière qu'il dégage, partout où l'on en a besoin. J'avais, en même temps que M. Boussingault, songé à la même application, et j'avais proposé d'adapter à un ballon hermétiquement fermé, dans lequel se trouvent les deux pointes de charbon disposées et préparées convenablement, une petite pile portative, mais très-forte (amalgame de potassium, et platine avec acide sulfurique étendu, et chlorure de platine), dont les deux pôles sont respectivement mis en communication, au moyen de fortes tiges de cuivre scellées au ballon, avec les charbons intérieurs. M. Grove a objecté à cette disposition la difficulté de sceller le récipient dans lequel la lumière électrique est dégagée, assez hermétiquement, pour que, sous l'influence de la haute température qui s'y développe, il ne s'établisse aucune communication avec l'air extérieur. Aussi propose-t-il de substituer à la lumière des pointes de charbon, celle qui provient d'un fil de platine tourné en hélice et rendu incandescent par le passage d'un courant voltaïque. Le fil est placé au-dessus de l'eau, dans l'intérieur d'un tube de verre. La forme en hélice présente l'avantage qu'en diminuant les causes de refroidissement, elle permet à la même batterie voltaïque de tenir en ignition un fil beaucoup plus long; il en résulte non-seulement un accrois-

sement de lumière, mais une diminution dans la dépense de la batterie à cause de l'augmentation de la résistance. L'accroissement dans l'intensité de la chaleur, en augmentant la résistance, diminue également la consommation des matériaux de la pile, de sorte que, contrairement à ce qui se passe ordinairement, l'augmentation de dépense diminue avec l'accroissement de l'effet qui est produit, du moins dans une certaine limite.

M. Grove a voulu se faire une idée exacte de cette dépense; dans ce but, il a introduit un voltamètre dans le circuit, sachant qu'à un équivalent d'hydrogène recueilli dans le voltamètre correspond la consommation d'un équivalent de zinc, d'un équivalent d'acide sulfurique, et de $\frac{1}{3}$ d'équivalent d'acide nitrique. En tenant compte de l'état d'hydratation des acides, on trouve que les frais d'une batterie de cinquante couples, à acide nitrique et platine, de huit pouces carrés de surface, se monteraient à 4 schellings, soit 5 francs par heure, pour produire une lumière dont l'intensité serait à celle d'une bougie, comme 1444 : 1. Les frais de la lumière électrique seraient donc peu considérables, eu égard à son intensité; toutefois, M. Grove estime que c'est surtout pour l'éclairage des phares qu'elle peut être employée avec avantage.

La chaleur qui se dégage dans un conducteur qui, tout en transmettant un courant, présente quelque résistance à son passage, a trouvé également des applications importantes. Ce mode de production de la chaleur présente, en effet, un caractère particulier qui permet son emploi dans beaucoup de cas où les autres modes ne seraient pas applicables. Ce caractère, c'est que la chaleur peut être transportée à une distance aussi grande que l'on veut de la source qui la produit, pour n'agir que sur un point déterminé sans se manifester le moins du monde entre ce point et le lieu de son origine. C'est particulièrement à l'art de faire sauter les mines qu'on a appliqué avec succès la propriété que possède le courant électrique de rendre incandescent un fil de métal qu'il traverse. M. Hare est le premier qui ait eu cette idée, mais c'est M. Roberts qui a imaginé le procédé le plus simple pour la réaliser.

Afin de ne pas être appelé à refaire un nouvel appareil pour

chaque explosion, M. Roberts a inventé des cartouches qu'on peut construire d'avance. On se procure dans ce but deux fils de cuivre de 2 à 3 millimètres de diamètre, et de 3 mètres de longueur environ, bien recouverts de soie ou de coton goudronné, afin que leur isolement soit très-bon. On les tord ensemble (fig. 363) sur une longueur de 16 centimètres en ayant soin de laisser libres, en les écartant de 1 à 2 centimètres, leurs extrémités inférieures sur une longueur de 1 centimètre ½ environ, dont on enlève l'enveloppe isolante pour tendre entre elles un fil de fer fin, après avoir eu soin de les bien décaper. Les extrémités supérieures des deux fils de cuivre sont également écartées pour pouvoir être mises respectivement en communication avec les conducteurs qui aboutissent aux pôles d'une pile. Le corps de la cartouche est un tube d'étain de 8 centimètres de longueur et de 2 de diamètre, dont les soudures sont très-bien faites afin qu'il soit parfaitement imperméable à l'eau [1]. On introduit le système des fils de cuivre dans le tube, en les fixant au moyen d'une tige qu'il traverse à une hauteur telle que le fil fin de fer se trouve au milieu du tube d'étain, disposé de façon que les bouts du fil de cuivre ne touchent nulle part les parois du tube (fig. 364). On consolide le liége à l'extrémité supérieure du tube avec un bon ciment [2], puis on remplit le tube de poudre par son autre extrémité, qu'on bouche également par un liége qu'on cimente de la même manière. La figure 365 indique comment l'on place la cartouche dans le trou de cuivre après

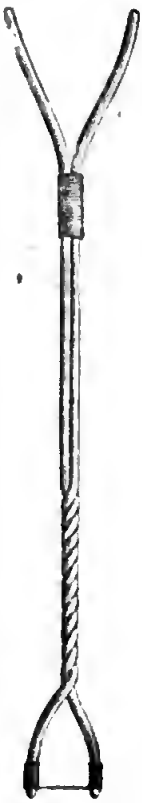


Fig. 363.

Fig. 364.

[1] On pourrait également employer un tube de verre, n'était sa fragilité qui a fait préférer un tube d'étain.

[2] M. Roberts recommande pour cette opération un ciment composé de une partie de cire d'abeilles et de deux parties de résine.

en avoir chassé avec soin toute la poussière et l'humidité; il faut avoir soin que la cartouche se trouve au milieu de la charge de poudre qu'on a introduite dans le trou. Au-dessus de la poudre, on place un bouchon de paille ou de filasse, de manière à laisser entre la poudre et lui un petit espace rempli d'air, et par dessus le bouchon on verse du sable sec jusqu'à ce que le trou en soit rempli. Puis on fait communiquer les deux extrémités des fils de cuivre qui sortent de la cartouche avec les pôles de la pile, au moyen de conducteurs assez longs pour qu'on soit à l'abri de tout danger provenant de l'explosion de la mine.

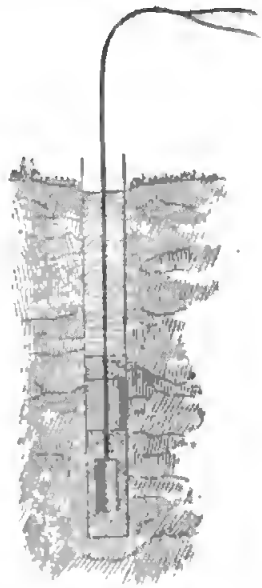


Fig. 365.

La méthode que nous venons de décrire présente l'avantage de pouvoir être employée à faire sauter des rochers ou autres objets sous l'eau, aussi bien que sous terre; seulement il faut dans ce cas pour construire des cartouches des boîtes de tôle imperméable à l'eau, et pour conducteurs des fils de cuivre recouverts de gutta-percha.

M. Ruhmkorff, et après lui M. Verdu, ont essayé avec succès de substituer à l'incandescence d'un fil métallique l'étincelle d'induction pour déterminer l'inflammation de la poudre. Ce procédé, outre l'économie considérable qu'il présente, puisqu'au lieu de 15 à 20 couples de Bunzen, nécessaires pour faire rougir un fil, il n'en exige qu'un seul pour produire l'étincelle d'induction, a l'avantage d'être moins susceptible de dérangement. Seulement il a fallu imaginer un artifice pour déterminer l'inflammation de la poudre; il arrive en effet que, lorsque, par l'effet de la longueur des conducteurs qui aboutissent à la mine, le circuit présente une résistance trop forte, l'étincelle d'induction peut passer à travers la poudre sans l'enflammer. M. Ruhmkorff a eu l'heureuse idée de chercher un intermédiaire qui, plus facilement inflammable par l'étincelle, pût provoquer

l'inflammation de la poudre dans toutes les conditions possibles. Il l'a trouvé dans les fusées de Stateham, qu'on prépare en prenant deux bouts do fil de cuivre rouge recouverts de gutta-percha ordinaire; on dégarnit de gutta-percha leurs extrémités; on les entortille (fig. 366), et on recourbe les bouts de manière à les faire entrer dans une enveloppe de gutta-percha vulcanisée (soufrée), que l'on a coupée et enlevée de dessus un fil de cuivre, qui en avait été recouvert depuis longtemps. On pratique sur cette enveloppe une échancrure *a b*, et, après avoir maintenu à deux ou trois millimètres l'une de l'autre les extrémités des fils de cuivre, on en recouvre les pointes de fulminate de mercure, afin de rendre l'inflammation de la poudre plus aisée. On remplit l'échancrure de poudre, et on enveloppe le tout avec un bout de tuyau de caoutchouc *c d*, ou bien on le place dans une cartouche remplie de poudre.

Fig. 366.

Dans les fusées de Stateham, c'est le sulfure de cuivre adhérent à la couche de gutta-percha vulcanisée qu'on enlève au fil de cuivre qu'elle recouvrait, qui, en s'enflammant sous l'action de l'étincelle d'induction, détermine l'explosion [1]. Mais il faut

[1] La découverte de ces fusées est due à une circonstance accidentelle, qui s'est présentée dans les expériences faites à Londres, lors de l'essai du télégraphe sous-marin de Douvres à Calais. Pour ces expériences le câble sous-marin avait été mis à une profondeur considérable dans l'eau. Quand on fit l'essai des fils, le constructeur, M. Stateham, amené à un examen minutieux de tout le câble par une solution de continuité qu'il avait constatée dans l'un des fils, aperçut, à son grand étonnement, des étincelles passer au travers de l'enveloppe de gutta-percha, et se succéder avec une grande rapidité. Après avoir examiné avec soin les diverses circonstances dans lesquelles le phénomène s'était produit, il crut reconnaître que c'était la légère empreinte du fil de cuivre sur la gutta-percha vulcanisée (soufrée), empreinte due à une couche de sulfure de cuivre, qui déterminait les étincelles qui accompagnaient la propagation du courant électrique, car les étincelles suivaient toujours cette empreinte. Il conçut dès lors l'idée de construire sur ce principe des fusées pour les mines.

avoir soin, quand on a préparé la fusée comme nous l'avons indiqué, de l'essayer, afin de régler en conséquence l'étendue de la solution de continuité. Il peut se faire en effet que, tout en appartenant à la même enveloppe d'un fil de cuivre, la gaîne de gutta-percha vulcanisée, dont on munit la fusée, soit plus ou moins imprégnée de sulfure de cuivre; or, si le sulfure de cuivre est en trop grande quantité, il devient trop bon conducteur, et empêche l'étincelle de se produire; si, au contraire, il n'est pas en assez grande quantité, il ne facilite pas suffisamment la décharge.

Les premiers essais en grand de l'application du procédé que nous venons de décrire ont été faits avec l'appareil d'induction de Ruhmkorff par le colonel espagnol Verdu, dans les ateliers de M. Herkman, fabricant de fils recouverts de gutta-percha à la Villette, près Paris. On a expérimenté successivement sur une longueur de fil de 400 mètres, de 600, de 1000, de 5000, et jusqu'à 26000, et le succès a toujours été complet, soit avec un circuit composé de deux fils, soit en remplaçant l'un des fils par la terre; deux couples de Bunzen ordinaires étaient suffisants pour produire avec l'appareil de Ruhmkorff l'étincelle d'induction. Depuis ses premières recherches avec M. Ruhmkorff, M. Verdu s'est livré à de nouvelles expériences en Espagne, et il s'est assuré, après beaucoup d'essais, que de toutes les substances explosibles, aucune n'était à beaucoup près aussi sensible que le fulminate de mercure; seulement pour éviter le danger qui résulte de la facilité d'explosion de ce composé, il a soin d'introduire l'extrémité des fusées dans un petit tube de gutta-percha fermé par le bout. Après avoir rempli de poudre cette espèce de petite boîte et l'avoir fermée hermétiquement, on peut transporter les fusées, les manier, les laisser tomber, les choquer même assez fortement sans danger. La nature élastique et corroyée de la gutta-percha qu'on a eu soin de ramollir un peu au feu, préserve le fulminate de toute chance d'accident. Ajoutons qu'avec un simple couple de Bunzen, et au moyen de l'appareil d'induction de Ruhmkorff, M. Verdu est parvenu à produire l'explosion simultanée de six fourneaux de mine interposés dans le même

circuit à 300 mètres de l'appareil; il n'a pas été au delà de cette limite; mais il a cherché le moyen d'agir indirectement sur un grand nombre de mines en les distribuant par groupes de cinq, et en interposant chacun de ces groupes dans un circuit particulier. On fait communiquer les fusées de chaque groupe par un seul fil dont l'une des extrémités s'enfonce dans le sol et dont l'autre est près de l'appareil. En touchant successivement l'appareil d'induction avec chacun des bouts libres que l'on tient à la main, ce qui exige à peine une seconde de temps s'il y a quatre fils, c'est-à-dire quatre groupes et par conséquent vingt mines, on obtient vingt explosions simultanées à des distances considérables. Il n'y a pas de limites ni à la distance à laquelle l'explosion peut avoir lieu, ni au nombre des mines qu'on peut faire sauter ainsi.

M. Dumoncel, afin d'obtenir plus de sécurité et un système immanquable dans ses effets, préfère diviser les mines par groupes de deux, supprime la communication par le sol et emploie ainsi pour chaque groupe deux conducteurs au lieu d'un (ce qui n'augmente pas beaucoup la dépense puisque l'un des fils peut être commun à tous les circuits), et les met en rapport avec les trois ou quatre grandes mines qui doivent partir en même temps. Pour obtenir avec cette disposition la simultanéité d'explosion à travers ces différents circuits, M. Dumoncel emploie un commutateur à rotation construit au moyen d'une roue épaisse de gutta-percha dont la circonférence porte cinq plaques métalliques, séparées les unes des autres par un intervalle de 2 centimètres environ; sur cette circonférence appuie un frotteur qui, par l'intermédiaire d'un bouton d'attache et d'un fil, communique avec celui des pôles de l'appareil de Ruhmkorff, qui fournit l'étincelle à distance. Les plaques elles-mêmes communiquent, par l'intermédiaire de lames métalliques placées sur les surfaces planes de la roue, à cinq ressorts frotteurs mis en relation par des boutons d'attache avec les cinq fils des circuits. M. Dumoncel a appliqué son procédé avec succès à l'explosion de mines *monstres* dans le port militaire de Cherbourg.

§ 2. Application des propriétés magnétiques du courant à la production d'un moteur mécanique.

Nous avons, dans notre premier volume[1], étudié avec soin la propriété que possède le courant électrique de développer dans le fer doux une aimantation dont la puissance n'a presque pas de limites. Nous avons également vu que la facilité avec laquelle le fer doux acquiert et perd son magnétisme avec la cause qui le produit, et la rapidité avec laquelle le sens de ce magnétisme peut changer avec celui du courant qui le développe, peuvent donner naissance, au moyen d'appareils construits dans ce but, à un mouvement continu, soit de rotation, soit de va et vient. Plusieurs physiciens ont cherché à utiliser ce mouvement et se sont occupés de la construction de machines dont le principe moteur serait l'aimantation produite dans des barreaux de fer doux par le passage de courants électriques à travers des fils tournés en hélice autour de ces barreaux. Avant de décrire ces appareils et d'examiner jusqu'à quel point leur emploi dans la mécanique appliquée serait avantageux sous le double rapport de la puissance et de l'économie, il est bon de rappeler brièvement, en les complétant, les notions que nous avons déjà données sur les électro-aimants et les lois qui les régissent. Ce sujet a occupé un très-grand nombre de physiciens, et si leurs résultats n'ont pas été concordants, cela tient à ce que les phénomènes dont il s'agit dépendent de trop de circonstances particulières pour présenter des lois bien générales. Nous en donnerons comme exemple la longueur des barreaux de fer doux qui, à conditions parfaitement semblables du reste, influe, suivant les uns, sur la quantité de poids qu'un électro-aimant peut porter, tandis qu'elle est sans influence suivant les autres. Or M. Nicklès a montré, comme nous l'avons vu[2], que c'est la première proposition qui est vraie si le barreau est rectiligne, et que c'est la

[1] Tome I, pages 285 et suivantes.
[2] Tome I, page 296.

seconde si le barreau est en forme de fer à cheval. Rappelons néanmoins brièvement les résultats relatifs au pouvoir des électro-aimants, auxquels on s'accorde généralement a ajouter le plus de confiance.

Dans un grand travail sur les lois de l'aimantation par les courants électriques, MM. Lenz et Jacobi avaient établi, à la suite d'un grand nombre d'expériences, la loi de la proportionnalité de la force d'aimantation à l'intensité des courants. L'aimantation était mesurée par le courant induit développé dans un fil conducteur qui environnait le barreau de fer doux soumis à l'aimantation; on tenait compte dans cette mesure de l'effet d'induction directement produit par le courant voltaïque. L'ensemble des résultats s'accorde avec la loi d'une manière très-satisfaisante, malgré les difficultés qu'à entraînées l'usage d'une pile à courant non constant[1], et l'on peut regarder comme démontré qu'entre des limites très-étendues et *lorsque le diamètre du barreau de fer doux n'est pas très-petit par rapport à sa longueur*, l'aimantation développée par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant.

Considérée comme formule empirique, la loi de MM. Lenz et Jacobi est d'une grande utilité, mais l'exactitude rigoureuse en a été fréquemment révoquée en doute, et dans ces dernières années les expériences de M. Müller ont fait voir qu'il n'y avait pas à y compter. Pour mesurer le magnétisme développé dans le fer doux, M. Müller s'est servi d'une méthode tout à fait directe et très-précise. Il a disposé son barreau de fer doux perpendiculairement au méridien magnétique, et à quelque distance, sur le prolongement de l'axe du barreau de fer doux, il a placé une boussole de déclinaison. Il a observé la déviation qu'a produite sur cette boussole l'action de l'hélice magnétique lorsqu'on y a fait passer le courant voltaïque sans y introduire de fer doux, et la déviation qui a eu lieu lorsque le barreau de fer doux a été placé dans l'hélice. La différence des tangentes de

[1] A l'époque où MM. Lenz et Jacobi ont exécuté leurs expériences, les piles à courant constant, d'invention encore récente, n'étaient pas d'un usage général parmi les physiciens.

ces deux déviations a donné la mesure du moment magnétique du barreau de fer doux [1]. L'intensité du courant était d'ailleurs mesurée par une boussole des tangentes.

L'hélice magnétisante dont M. Müller s'est servi était formée de deux hélices distinctes engagées l'une dans l'autre. L'hélice intérieure avait 532 millimètres de longueur, un diamètre intérieur de plus de 15 millimètres, et était formée de 408 spires d'un fil de cuivre de $3^{mm},1$ de diamètre. L'hélice extérieure avait 432 millimètres de longueur, un diamètre intérieur d'au moins 45 millimètres, et était formée de 372 spires d'un fil de cuivre de $2^{mm},7$ de diamètre. On pouvait à volonté faire passer le courant dans l'une ou l'autre des hélices ou dans les deux à la fois. Les barreaux de fer doux étaient au nombre de quatre; ils avaient tous 560 millimètres de longueur et respectivement 9, 12, 15 et 44 millimètres de diamètre.

Pour le barreau de 44 millimètres de diamètre, la proportionnalité de l'aimantation et de l'intensité s'est assez exactement vérifiée; mais les autres barreaux se sont complétement écartés de cette loi. L'accroissement du moment magnétique a toujours eu lieu dans un rapport beaucoup moindre que l'accroissement de l'intensité du courant. C'est ce dont on peut s'assurer graphiquement en traçant des courbes dans lesquelles on prend pour abcisses les intensités du courant et pour ordonnées les moments magnétiques.

[1] M. Gauss a, en effet, démontré que si on appelle R la distance des milieux de deux barreaux, situés comme dans l'expérience de M. Müller, M le moment magnétique du barreau fixe, T la composante horizontale de l'action terrestre, R un coefficient constant, et u la déviation, on a avec une grande approximation:

$$\text{Tang. } u = \frac{1}{T}\left(\frac{M}{R^2} + \frac{B}{R^3}\right)$$

Il suit de là que si R est très-grand, le terme $\frac{B}{R^3}$ devenant négligeable, la tangente de la déviation est proportionnelle au moment magnétique du barreau fixe. (Voyez le Mémoire de M. Gauss sur la mesure de l'intensité de la force magnétique terrestre, traduit dans les *Annales de chimie et de physique*, 2e série, tome LVII, page 5.)

Les résultats des expériences de M. Müller avaient été contestés par MM. Buff et Zamminer qui, en suivant une méthode entièrement semblable à celle de ce physicien, avaient observé une proportionnalité assez exacte entre l'intensité d'un courant voltaïque et l'aimantation qu'il produit. Ils avaient en conséquence attribué les résultats obtenus par M. Müller à l'influence de la force coercitive. Afin d'écarter complètement cette objection, M. Müller s'est spécialement attaché à démontrer d'une manière péremptoire un principe qu'il avait déjà entrevu à la suite de ses premières recherches, savoir l'existence pour chaque barreau de fer doux d'un maximum d'aimantation qui ne peut être dépassé, condition qui est évidemment incompatible avec la loi de proportionnalité.

M. Müller n'a rien changé au principe de sa méthode. Il en a seulement perfectionné l'exécution en substituant des magnétomètres aux boussoles de ses premières expériences. En outre, comme M. Buff et Zamminer s'étaient servis d'hélices magnétisantes beaucoup plus courtes que les siennes (86 millimètres seulement de longueur), il a étudié l'influence que peut exercer la longueur des hélices en prenant trois hélices différentes, de 155 millimètres, 300 millimètres et 532 millimètres de longueur. Il a également employé des barreaux de fer doux de diverses dimensions, et il a apporté le plus grand soin à s'assurer qu'ils étaient entièrement dépourvus de force coercitive.

Les résultats numériques des expériences fort nombreuses et très-exactes qu'a faites M. Müller font bientôt reconnaître que la proportionnalité n'existe entre des limites un peu étendues que lorsque le diamètre des barreaux dépasse une certaine valeur, qui est d'autant plus grande que le barreau est plus long. Ainsi un barreau de 167 millimètres de longueur et 12 millimètres de diamètre suit assez exactement la loi de proportionnalité ; un barreau de 588 millimètres de longueur et 12 millimètres de diamètre s'en écarte tout de suite d'une manière très-marquée. Dans les barreaux d'un petit diamètre, on voit que la proportionnalité n'existe que pour des courants extrêmement faibles. L'existence d'un maximum d'aimantation est accusée par les expériences, de la manière la plus évidente,

pour la plupart des barreaux ; pour quelques-uns même on peut dire que les expériences ont atteint ce maximum[1]. L'existence d'un maximum vers lequel tend l'aimantation a, comme nous le verrons, une grande importance dans la construction des machines électro-motrices, puisqu'elle assigne à leur puissance une limite qu'on ne peut franchir, lors même qu'on augmenterait indéfiniment la force des courants électriques.

Comme nous l'avons vu, l'intensité du courant, quoique la

[1] L'existence d'un maximum d'aimantation peut être regardée comme favorable à la théorie d'Ampère, que nous avons adoptée et développée (tome I, page 226), et dans laquelle l'aimantation consiste à donner une direction perpendiculaire à l'axe du barreau aux courants moléculaires du fer. Il est évident que lorsque la force aimantante a été assez considérable pour donner cette direction à *tous* les courants moléculaires, il n'y a pas possibilité à ce qu'une augmentation dans l'intensité de la force augmente le magnétisme. Ce point de vue a attiré sur cette question l'attention de M. W. Weber, qui, dans la troisième partie de ses *Électrodynamische Maasbestimmungen* (Leipzig, 1852), a publié quelques expériences confirmatives de celles de M. Müller. La méthode d'observation a été exactement la même; le barreau de fer étudié avait $100^{mm},2$ de longueur, $3^{mm},6$ de diamètre et pesait $8^{gr}\cdot 190$; l'hélice magnétisante était un peu plus longue que le barreau. Le tableau suivant contient les résultats des expériences. On y a représenté par f un nombre proportionnel à l'intensité du courant, par m le moment magnétique.

f	m
658,9	911,1
1381,5	1424,0
1792,0	1547,9
2151,0	1627,4
2432,8	1680,7
2757,0	1722,7
3090,6	1767,3
3186,0	1787,7
2645,6	1707,9
2232,1	1654,0
1918,7	1584,1
1551,2	1488,9
1133,1	1327,9
670,3	952,0

Il suffit de jeter les yeux sur ces chiffres pour reconnaître qu'il n'y a aucune proportionnalité entre l'intensité du courant et l'aimantation, et que, lorsque l'intensité croît indéfiniment, l'aimantation tend vers un maximum.

plus importante, n'est pas la seule circonstance qui influe sur la puissance des électro-aimants. Le diamètre des barreaux, suivant M. Dub, augmente leur puissance dans un rapport qui, dans certaines limites du moins, est celui de ces diamètres eux-mêmes. Nous avons déjà rappelé ce qui concerne les longueurs. Quant à la masse, il paraîtrait qu'elle n'exerce pas d'influence bien sensible; car, suivant M. de Haldat un cylindre de fer creux prend, sous l'influence de la même hélice traversée par le même courant, autant de magnétisme qu'un cylindre plein de même diamètre et de même longueur. Ce résultat, qui a été vérifié dans un très-grand nombre de cas, est généralement admis, et a permis dans bien des cas de diminuer la masse des appareils dans lesquels on fait usage d'électro-aimants sans atténuer en rien leur puissance.

Mais l'un des points qui, à circonstances semblables, influe le plus sur la perfection des appareils électro-moteurs, c'est la nature du fer doux dont on fait usage et son aptitude à acquérir et à perdre promptement son magnétisme ou à prendre successivement des pôles magnétiques inverses. Il n'y a, en ce qui concerne ce point, aucune règle à donner, sinon qu'il est préférable de se servir de fer ancien préparé avec du bois et de le faire recuire un très-grand nombre de fois.

Les électro-moteurs sont des machines dans lesquelles la puissance motrice est une force électro-magnétique, c'est-à-dire qu'ils sont tous fondés sur l'existence d'une force susceptible d'être détruite instantanément par une cause physique et non mécanique. Car, de la même manière qu'un jet d'eau froide détermine la condensation de la vapeur, dont la force élastique soulève le piston dans le cylindre d'une machine à vapeur, tout appareil électro-magnétique perd ses propriétés dès l'instant que le courant électrique n'y circule plus; on conçoit donc la possibilité de faire naître soit un mouvement oscillatoire, soit un mouvement continu de rotation, par des impulsions provenant d'actions qui cessent lorsque la masse soumise à l'impulsion a parcouru le champ de la force, et on voit en même temps la différence essentielle qui sépare, au point de vue mécanique, les phénomènes électro-magné-

tiques des propriétés magnétiques des aimants permanents.

Nous allons étudier d'abord les électro-moteurs dans lesquels on a utilisé l'action des électro-aimants, et nous décrirons ensuite quelques appareils qui reposent sur l'attraction qu'exerce une hélice sur un fer doux. Dans l'ordre chronologique, la première machine à citer est celle de dal Negro, qui eut l'idée de faire osciller un aimant ordinaire entre les deux pôles d'un électro-aimant qui changeaient de polarité à chaque oscillation ; ce mouvement oscillatoire se transformait facilement en un mouvement de rotation continu. Depuis dal Negro, on a imaginé un grand nombre d'appareils fonctionnant soit de la même manière, soit par le mouvement de va et vient d'armatures en fer doux attirées par des électro-aimants, puis retombant par leur propre poids ; mais M. Jacobi est le premier qui ait construit un électro-moteur dans lequel le mouvement primitif ait été un mouvement de rotation continu, et par des considérations mécaniques fort simples, il a montré que toute disposition dans laquelle le pouvoir attractif ou répulsif des masses électro-magnétiques produit un mouvement oscillatoire, est contraire au mode d'action de l'électro-magnétisme. On sait, en effet, que dans une machine l'accroissement de la force motrice ou de la puissance donne lieu à une augmentation de vitesse, si la résistance reste constante, et que cette augmentation de vitesse produit ce qu'on nomme de la force vive, et peut ensuite se transformer en travail utile. Or, l'attraction qu'exerce un électro-aimant est une fonction de la distance dont on ne connaît pas exactement la forme, mais qui est telle que la force attractive augmente rapidement, quand la distance diminue et qu'elle est maximum au contact. Il en résulte que dans un appareil oscillant, la vitesse et par conséquent la force vive de la masse attirée sont les plus grandes, au moment même où elles sont nécessairement détruites, puisque le mouvement change de sens, en sorte qu'une portion considérable de la force vive développée par l'action électro-magnétique est détruite en pure perte par un choc. M. Jacobi ajoute qu'il en a été longtemps ainsi pour la vapeur qui n'est devenue un moteur réellement utile que du jour où Watt a

imaginé la détente, c'est-à-dire a permis au piston d'arriver à l'extrémité de sa course avec une vitesse à peu près nulle. Il résulte clairement de ces considérations que dans tout électro-moteur où la force utilisée provient d'un électro-aimant, un mouvement circulaire continu primitif est le seul à employer, ce qui fait que nous ne nous attachons pas à décrire les divers appareils oscillants qu'on a imaginés.

Nous donnons ici (fig. 367) la figure de l'électro-moteur de M. Jacobi. Quatre électro-aimants en fer à cheval sont disposés

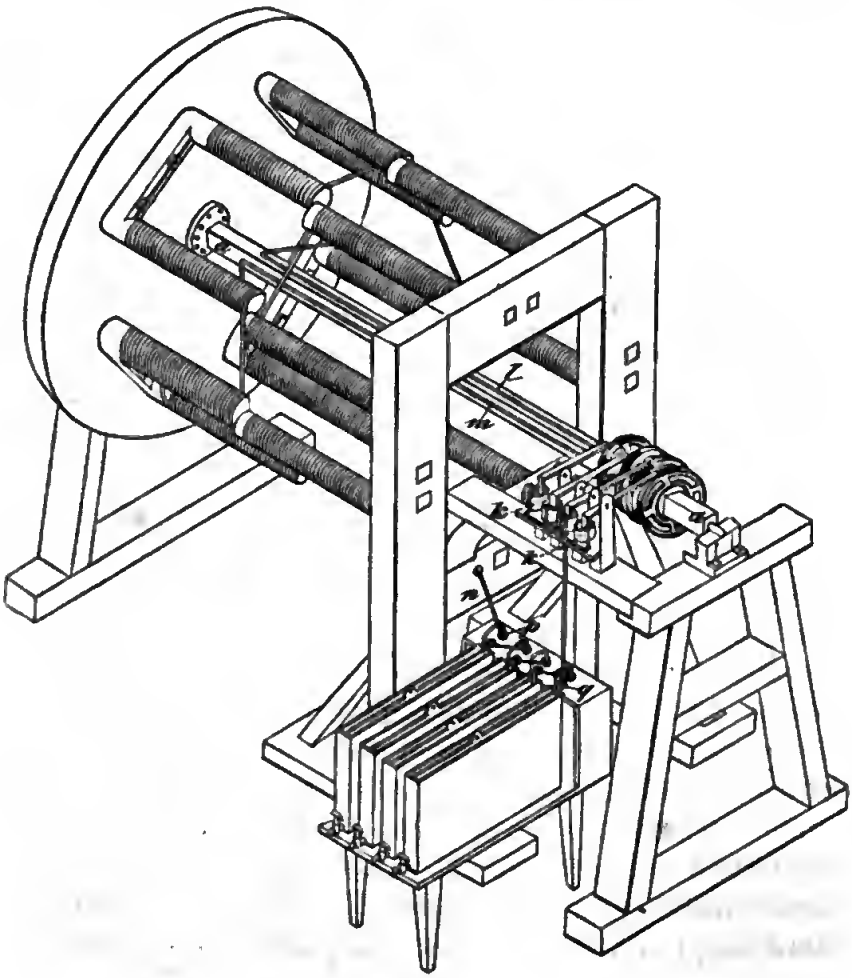


Fig. 367.

horizontalement contre un disque vertical mobile autour d'un axe A, vis-à-vis de quatre autres placés sur un bâti fixe, de telle

sorte que les pôles des premiers puissent venir exactement en face et à la moindre distance possible des pôles des électro-aimants fixes. Le même courant passe simultanément dans toutes les hélices; il garde toujours le même sens dans le système des électro-aimants fixes, mais il peut en changer dans le système des électro-aimants mobiles. Supposons, en effet, un pôle mobile placé près d'un pôle fixe de nom contraire, il y a attraction, mais du moment qu'ils sont en regard l'un de l'autre, si l'attraction subsiste l'impulsion sera détruite; si, au contraire, par l'inversion du courant dans le pôle mobile, ils deviennent pôles de même nom, au moment où ils sont vis-à-vis l'un de l'autre, ils se repoussent et une nouvelle impulsion est donnée dans le même sens que la précédente; ce que nous venons d'analyser pour un pôle mobile devra se passer pour tous, et toutes les fois que chacun d'eux passera devant un pôle fixe. Le changement de polarité est donc un objet de la plus haute importance; il faut pouvoir l'opérer instantanément, et c'est à quoi sert la partie de la machine nommée commutateur, que nous retrouverons dans tous les électro-moteurs, sous des formes plus ou moins ingénieuses. Il se compose ici de quatre disques en cuivre fixés sur l'axe de la machine et dont les circonférences portent quatre secteurs d'ébène également espacés. Les deux disques du milieu sont isolés l'un de l'autre et chacun est réuni au disque voisin par un tube en cuivre séparé de l'axe par un corps isolant. Quatre barres de cuivre, en forme de levier, reposent d'une part sur les disques et se terminent de l'autre par des tiges recourbées à angle droit, qui plongent dans des godets *k* contenant du mercure dont les deux extrêmes ainsi que les deux du milieu, sont joints entre eux par des conducteurs. Le fil qui entoure les électro-aimants fixes a ses deux extrémités, l'une au pôle *p* de la pile, l'autre dans le godet le plus rapproché du corps de la machine; celui qui entoure les électro-aimants mobiles communique par les fils *l* et *m* avec les deux couples de disques qui se meuvent avec lui; enfin le second pôle *q* de la pile est relié à l'un des godets du milieu. Il est facile maintenant de comprendre comment le courant passe tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, à travers le conducteur qui constitue les élec-

tro-aimants mobiles, suivant qu'un secteur de bois ou d'ébène arrive en contact avec un levier sur l'un ou l'autre des disques, par le fait de la rotation de l'axe, et comment on peut disposer les disques de façon à effectuer l'inversion du courant pour des positions données des pôles mobiles. Nous avons décrit la disposition adoptée par M. Jacobi, dans le premier appareil qu'il a construit, mais l'arrangement des électro-aimants admet la plus grande variété, pourvu qu'il soit exactement symétrique par rapport à l'axe et qu'il permette aux pôles de se rencontrer le plus près possible. Pour que l'action ne soit pas trop oblique, par rapport à la direction du mouvement, vu que le centre d'attraction magnétique se trouve à une certaine distance de l'extrémité des barreaux, il serait plus convenable de disposer les axes des cylindres de fer doux mobiles perpendiculairement à ceux des fers doux fixes. Un certain nombre d'appareils fondés sur le même principe ont été construits depuis celui de M. Jacobi, entre autres celui de M. Loiseau, dans lequel le courant ne passe à travers les électro-aimants qui doivent agir l'un sur l'autre que lorsque ceux-ci sont à une faible distance, disposition qui utilise mieux la force développée par le courant.

On a construit aussi des appareils dans lesquels on se sert de l'action d'électro-aimants sur des aimants permanents, et nous citerons un électro-moteur inventé par M. Davenport, mis en usage à New-York. Deux petits électro-aimants horizontaux placés en croix et mobiles autour d'un axe vertical tournent à l'intérieur d'un cercle également horizontal formé par deux aimants courbés en demi-cercles et dont les pôles de noms contraires sont en regard. Le jeu de l'appareil est aisé à comprendre; les extrémités des électro-aimants qui changent de polarité par le moyen d'un commutateur, sont attirées, puis repoussées par les pôles des aimants.

Nous arrivons maintenant aux électro-moteurs fondés sur l'attraction qu'exerce un électro-aimant sur une armure de fer doux, et qui paraissent être plus avantageux que ceux que nous avons décrits précédemment; sans qu'il soit possible d'établir d'une manière précise les causes de leur supériorité; on peut cependant en donner quelques raisons. En

effet, dans ce système, il n'y a plus changement de polarité, mais seulement aimantation discontinue toujours dans le même sens, ce qui exige un commutateur bien moins compliqué et pouvant fonctionner avec plus de régularité; en second lieu, il semble probable que cette simple alternative d'aimantation et de désaimantation permet un développement de magnétisme plus énergique qu'un changement continuel de polarité; enfin il peut arriver que le pouvoir répulsif de deux électro-aimants, de dimensions différentes se change en un pouvoir attractif, le plus faible des deux n'étant plus qu'un fer doux par rapport au plus puissant, et on conçoit, sans que la répulsion soit complétement détruite, qu'elle puisse être diminuée par la même cause.

La figure 368 représente un électro-moteur construit par M. Froment dans de fort bonnes conditions. Il se compose de

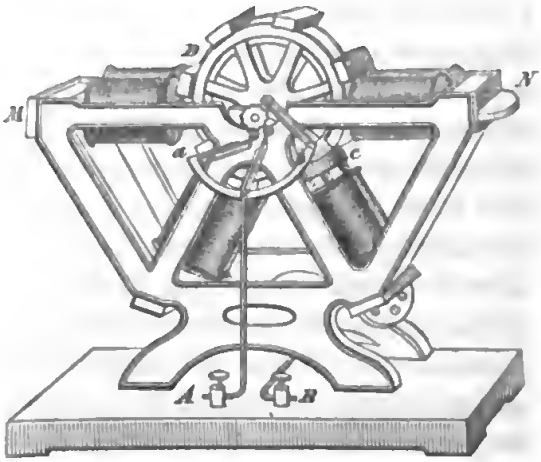


Fig. 368.

quatre électro-aimants fixes soutenus par un bâti en fonte M N, dans lesquels un même courant circule tour à tour. Huit armatures en fer doux sont disposées sur une roue mobile; quand une armature arrive près du pôle d'un électro-aimant, celui-ci s'aimante, puis cette aimantation cesse au moment où la pièce de fer doux attirée se trouve vis-à-vis de lui; la roue reçoit ainsi une série d'impulsions qui déterminent un mouvement rapide; voici comment s'effectue la distribution du courant. Sur un demi-cercle en cuivre fixé au bâti de fonte autour de

l'axe de l'appareil, on a disposé trois communicateurs à roulette dont l'un est figuré à part (fig. 369). Il se compose de deux

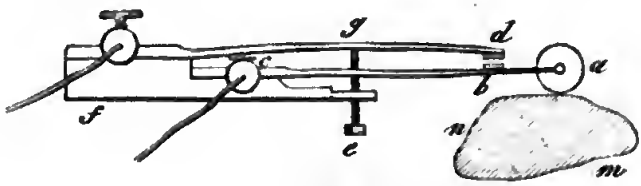


Fig. 369.

lames métalliques *gd* et *cb* entre lesquelles il n'y a de communication électrique que, lorsque la roulette *a* étant soulevée, les deux petits cylindres *d* et *b* viennent en contact. Si donc, de ces deux lames, la première communique toujours avec l'un des pôles de la pile par l'intermédiaire du demi-cercle en cuivre et le second avec le fil d'un électro-aimant, qui, par son autre extrémité, soit relié à l'autre pôle de la pile, on voit que le courant passera au travers de l'hélice dès que la roulette sera soulevée et cessera de passer dès qu'elle retombera; or, ce sont les dents d'une petite roue fixée sur l'axe de la machine qui soulèvent tour à tour les roulettes des communicateurs, dont deux correspondent aux deux électro-aimants extrêmes, tandis que la troisième est en rapport avec les deux électro-aimants inférieurs qui se trouvent toujours dans les mêmes conditions. L'aimantation n'a lieu que lorsque l'armature est très-voisine des pôles, et on conçoit qu'elle ne dure pas longtemps, puisque les quatre électro-aimants s'aimantent successivement dans l'intervalle de temps qui s'écoule entre les passages de deux armatures successives devant un même pôle. Lorsqu'un électro-moteur fonctionne, chaque fois que le courant cesse de passer dans une hélice, ou, ce qui revient au même, y change de sens, puisque pour changer de sens il faut nécessairement qu'il cesse un instant, il se produit un extra-courant et par conséquent une étincelle à l'endroit de l'interruption; cette étincelle a l'inconvénient très-grave d'oxyder les contacts du commutateur et de déterminer promptement des irrégularités dans la marche de l'appareil. M. Froment est parvenu à diminuer considérablement l'intensité de l'étincelle due à l'extra-courant, en dispo-

sant les communicateurs de façon à ce que le courant commence à passer dans le conducteur voisin avant qu'il cesse dans le circuit où il chemine. De cette façon, le courant est diminué de moitié au moment où il est interrompu, ce qui diminue d'autant l'étincelle d'induction qui finit par disparaître en appliquant cette méthode à des appareils munis d'un nombre considérable d'électro-aimants.

M. Froment et d'autres physiciens ont construit un assez grand nombre d'électro-moteurs ne différant de celui que nous avons décrit que par leurs dimensions ou par des modifications de peu d'importance. Dans tous ces appareils, les armatures passent devant les électro-aimants suivant une ligne perpendiculaire à leur axe, et restent par conséquent toujours à une distance plus ou moins grande de leurs pôles. Or comme le pouvoir attractif dû à l'électro-magnétisme croît rapidement quand la distance diminue, on n'utilise pas ainsi toute la force que seraient capables de développer les électro-aimants qui fonctionnent. Il était donc intéressant de trouver une disposition telle que l'électro-aimant et l'armature pussent venir en contact, tout en évitant le choc et les inconvénients des appareils oscillants; c'est dans ce but que MM. Wheatstone, Froment et Marié ont imaginé des électro-moteurs dans lesquels une roue munie à sa circonférence d'armatures ou d'électro-aimants roule contre la surface intérieure d'un cercle tangent aux pôles d'électro-aimants fixes et disposés symétriquement tout autour. La roue mobile imprime un mouvement de rotation à l'axe de la machine qui passe par le centre du cercle fixe, et on profite ainsi de l'action magnétique jusqu'au point de contact des masses aimantées.

M. Larmanjeat est parvenu à un résultat plus avantageux par une disposition différente, et son appareil, dont M. Becquerel donne la description, est disposé de la manière suivante : les armatures sont des cylindres de fer doux M, pouvant tourner autour de leur axe qui est fixe, et placés parallèlement les uns aux autres de manière à former un cylindre long de 1^{m} environ, dont la partie gauche de la figure 370 représente la coupe transversale; trois électro-aimants disposés à la suite les uns des autres sont mobiles autour de leur axe commun A qui est

aussi l'axe de figure du cylindre formé par les armatures. La partie droite de la même figure représente un de ces électro-aimants qui se compose d'un barreau de fer doux muni de trois disques E perpendiculaires à son axe et séparés par deux hélices

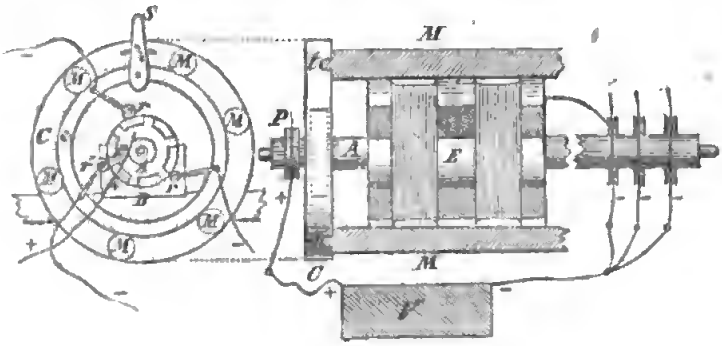


Fig. 370.

qui constituent ainsi un double électro-aimant circulaire; ces disques de fer sont tangents aux cylindres de fer doux qui, par leur mobilité autour de leurs axes respectifs, n'opposent aucun obstacle à leur mouvement de rotation, bien qu'en contact avec eux, et leurs circonférences présentent six secteurs en cuivre également espacés; lorsqu'un secteur de fer arrive près d'une armature, le courant passe dans les hélices, il se produit une attraction qui dure jusqu'au moment où la partie en fer de la circonférence du disque se trouve placée symétriquement de part et d'autre du point de contact; à cet instant, l'aimantation cesse, puis recommence pour un autre secteur de fer, et ainsi de suite. Les lignes de séparation des secteurs de cuivre et de fer sur les trois électro-aimants forment une hélice, ce qui fait que chaque armature est continuellement en action sur l'un de ses points. Nous n'avons rien à dire de spécial sur le commutateur représenté dans la figure dont le mécanisme n'offre ici aucune particularité.

Nous avons ainsi passé en revue les principaux électromoteurs fondés sur le pouvoir attractif ou répulsif des électro-aimants, et il nous reste, pour compléter cette description succincte, à dire quelques mots des appareils fondés sur l'action qu'exerce une hélice sur un fer doux; on se rappelle en effet

que si l'on présente un cylindre de fer doux devant l'ouverture d'une hélice dans laquelle circule un courant, il est immédiatement attiré, et ne s'arrête que lorsqu'il est placé symétriquement par rapport au milieu de l'hélice. On conçoit que cette action électro-magnétique puisse être utilisée comme force motrice, car, d'après ce que nous venons de voir, elle peut fournir à la masse de fer doux une course considérable, mais on voit qu'il est impossible qu'elle fasse naître un mouvement circulaire primitif, tandis qu'elle donne lieu tout naturellement à un mouvement de va-et-vient; du reste, il est probable que les objections qu'a faites M. Jacobi aux appareils oscillants ne s'appliquent pas dans ce cas, du moins avec autant de rigueur, car il semble naturel de croire que la force avec laquelle le fer doux est entraîné dans l'hélice diminue à mesure qu'il s'y enfonce, puisqu'elle finit par devenir nulle.

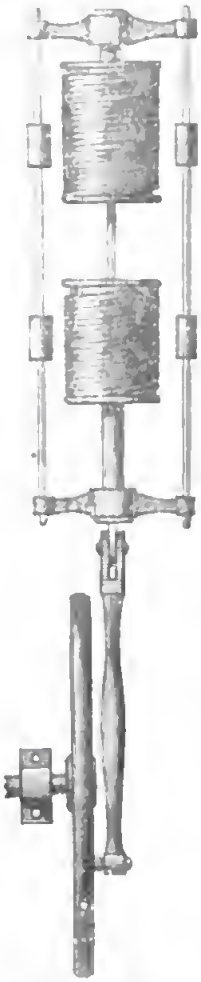


Fig. 371.

La figure 371 représente l'électro-moteur de M. Page; il se compose de deux bobines fixées horizontalement de telle sorte que leurs axes soient dans le prolongement l'un de l'autre; deux cylindres de fer doux joints par une tige de cuivre sont liés à un système de glissières qui leur permet d'osciller parallèlement à l'axe des bobines et qui s'articule à une bielle au moyen de laquelle le mouvement de va-et-vient est transformé en un mouvement circulaire. Le courant passe dans la première hélice, le fer doux correspondant s'y enfonce, ce qui fait sortir le second fer doux de la seconde hélice; par l'intermédiaire d'un commutateur, le courant passe alors de la première à la seconde bobine, qui à son tour agit sur le cylindre de fer doux qui lui correspond, et l'on voit comment se produit ainsi le mouvement de va-et-vient du système mobile. On doit à M. Dumoncel un appareil analogue dans lequel les bobines elles-

mêmes peuvent osciller comme le font les cylindres des machines à vapeur oscillantes, ce qui permet d'articuler directement la tige liée au fer doux avec la manivelle d'une roue.

Après avoir étudié les principaux électromoteurs à un point de vue exclusivement mécanique, c'est-à-dire en nous rendant compte seulement de la disposition de ces appareils et des avantages ou des inconvénients qu'ils présentent pour utiliser les forces que l'électricité dynamique y développe, il est intéressant d'entrer plus avant dans la question, d'analyser ce qui se passe quand une de ces machines est en mouvement, et enfin de comparer, quant à l'effet utile, les forces électro-magnétiques aux autres forces motrices. C'est à M. Jacobi qu'on doit la plupart des notions précises et réellement scientifiques qu'on a acquises sur la théorie des électromoteurs. Il fallait en effet connaître d'abord les lois des électroaimants, c'est-à-dire la manière dont leur magnétisme varie soit avec la nature de l'hélice, c'est-à-dire le nombre de ses tours et la grosseur de son fil, soit avec la forme même, la longueur et la grosseur des fers doux; or c'est là, comme nous l'avons vu, l'objet des recherches de MM. Lenz et Jacobi, qui sont arrivés à des lois sinon très-générales, du moins approchées dans des limites étendues. Mais il restait un autre élément de la question à éclaircir. Considérons un électromoteur en mouvement, celui de M. Jacobi, par exemple, n'exécutant aucun travail utile et n'ayant à vaincre par conséquent que la résistance de l'air et celle qui est due aux divers frottements de la machine; le commutateur rend instantanés les changements de polarité, quelle que soit la rapidité du mouvement; nous admettons que l'excitation électro-magnétique du fer doux se produit aussi d'une manière instantanée, et enfin que l'attraction ou la répulsion des masses magnétiques est indépendante de leurs vitesses relatives. Nous sommes donc en présence d'une force constante qui doit produire un mouvement accéléré que le frottement ne pourra rendre uniforme puisqu'il est indépendant de la vitesse, mais seulement la résistance de l'air qui croît avec elle. Or il est facile, en partant de cette hypo-

thèse, de calculer approximativement la vitesse dont sera animé l'appareil lorsque le mouvement sera devenu uniforme, et on trouve qu'elle est beaucoup plus grande que la vitesse limite qu'on ne peut dépasser. C'était donc dans la force motrice elle-même qu'il fallait chercher la cause de cette limite, et, en partant de ces considérations mécaniques, M. Jacobi a établi nettement l'influence de l'induction. En effet, tout électromoteur en mouvement fonctionne en même temps comme machine magnéto-électrique; indépendamment des extra-courants qui se développent par l'influence des hélices sur elles-mêmes et qui ne naissent du mouvement que parce que le mouvement de l'appareil fait marcher le commutateur, des courants d'induction prennent naissance, ou, si l'on aime mieux, tendent à prendre naissance dans les hélices qui s'approchent ou qui s'éloignent l'une de l'autre, et ces courants marchent, d'après la loi de Lenz, en sens contraires de ceux qui produisent l'aimantation. Il y a donc nécessairement diminution dans l'intensité des courants magnétisants, diminution d'autant plus grande que le mouvement est plus rapide. Dès lors, on voit comment l'augmentation de la vitesse produit une diminution de la force motrice, et comment, quand arrive l'instant où cette force est précisément égale aux résistances passives de la machine, le mouvement devient uniforme. Ainsi, lorsqu'on interpose un galvanomètre dans le circuit, tant qu'on empêche l'électromoteur de fonctionner, l'aiguille est déviée d'un angle constant; mais, dès que le mouvement commence, la déviation de l'aiguille diminue, et elle ne cesse de diminuer que lorsque le mouvement est devenu uniforme. On peut donc dire que le mouvement introduit dans le circuit une résistance qui va en croissant quand il s'accélère; toutefois il faut bien remarquer qu'il n'y a pas là une perte réelle de force, puisque le zinc consommé reste toujours proportionnel à l'intensité du courant, mais seulement réductions simultanées de la dépense et de la force mise en jeu.

En partant des lois déjà citées des électro-aimants, de celles qu'on admet pour les courants d'induction, et enfin des lois générales de Ohm, M. Jacobi a pu soumettre au calcul la théorie

des machines électromotrices[1]. Parmi les résultats auxquels il est arrivé, il en est un qui résume à peu près tous les autres et dont nous parlerons ici; c'est l'expression qu'il a trouvée pour le travail maximum qu'est susceptible de donner un électromoteur. On sait que dans une machine en mouvement, le travail moteur est le produit de la force motrice par la vitesse de son point d'application, et que de plus, si le mouvement est uniforme, le travail moteur est égal au travail résistant qui se compose lui-même du travail utile et des résistances passives de la machine. Les électromoteurs jouissent toujours de la propriété d'être susceptibles d'un maximum d'effet utile, propriété à laquelle participent la plupart des autres machines, vu qu'il n'en est presque pas où, parmi les forces agissantes, soit résistantes, soit motrices, il n'y en ait au moins une qui varie avec la vitesse. Or, dans un électromoteur c'est, d'après ce que nous avons vu, la force motrice qui diminue lorsque la vitesse augmente; on comprend donc comment l'expression du travail moteur composée de deux facteurs qui varient en sens contraires doit passer par un maximum, et M. Jacobi a trouvé qu'elle l'atteint, lorsque la vitesse est telle que l'intensité du courant est devenue la moitié de ce qu'elle est, lorsqu'on maintient l'appareil au repos. Mais ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que les hélices des électroaimants n'entrent dans l'expression de ce travail maximum que par leur résistance totale, en sorte que, cette résistance restant la même, on peut augmenter ou diminuer le nombre de leurs spires, sans apporter le moindre changement au maximum de travail, mais en faisant varier seulement ses éléments, c'est-à-dire la force et la vitesse. La disposition du conducteur sur les bobines joue donc ici un rôle analogue à celui d'un organe de transmission dans les machines ordinaires, c'est-à-dire, qu'en la faisant convenablement varier, on peut tout en produisant le maximum de travail moteur, faire marcher l'appareil dans les conditions de vitesse les plus favorables au travail utile qu'on veut effectuer. En outre, ce résultat a ceci d'important qu'il montre l'inutilité des tentatives qu'on a faites,

[1] Voyez la note finale G.

Digitized by Google

et qu'on pourrait faire pour arriver à des résultats plus avantageux en donnant aux électroaimants de grandes dimensions. En résumé, d'après la théorie de M. Jacobi, le travail maximum qu'on peut obtenir avec une pile donnée, varie suivant l'électromoteur avec un coefficient qui dépend de la disposition générale de l'appareil et de la force coercitive du fer doux qui y est employé; c'est la valeur de ce coefficient qui caractérise une machine électromotrice, et nous nous sommes occupés, en décrivant ces machines, des circonstances qui le font varier. De plus, la force électromotrice de la combinaison voltaïque dont on se sert, entre comme facteur dans l'expression de ce même travail maximum, en sorte qu'à égalité de zinc dissous, une pile de Grove donne 1 $\frac{3}{4}$ plus de travail qu'une pile de Daniell, mais le rapport du travail obtenu au zinc dépensé est indépendant de la disposition de la batterie. Ces résultats obtenus par M. Jacobi ont l'avantage d'éclaircir les notions vagues qu'on avait avant lui sur toute cette théorie, et d'établir nettement quels sont les organes des électromoteurs qui sont susceptibles de perfectionnement. C'est d'une part la disposition générale de l'appareil, sans comprendre dans cet ensemble de conditions diverses, celles qui sont relatives à la construction des électroaimants, et de l'autre la force électromotrice de la pile et non pas la manière dont elle est disposée.

La théorie qu'ont donnée des électromoteurs MM. Joule et Scoresby repose sur l'hypothèse de la transformation de la chaleur en travail mécanique. M. Joule a démontré que, si toute la chaleur développée par la solution d'un grain de zinc dans la pile de Daniell était utilisée, son pouvoir mécanique, qu'on déduit de l'équivalent mécanique de la chaleur, serait représenté par un poids de 150 livres élevé à la hauteur d'un pied. D'un autre côté, on admet que cette chaleur chimique se transforme, soit en effets calorifiques, soit en effets mécaniques dans le circuit. Considérons maintenant un électromoteur dans lequel le courant circule, mais qui est maintenu au repos et soit a l'intensité du courant. Si on laisse marcher l'appareil, l'intensité du courant diminue et devient b. Les quantités de chaleur développées dans les deux cas sont entre elles comme

$a^2 : b^2$; mais le travail total, tant calorifique que mécanique, doit toujours être dans un rapport constant avec l'intensité du courant ou, ce qui revient au même, avec la quantité de zinc consommée. Il faut donc que dans le second cas la quantité x de travail mécanique soit telle que l'on ait :

$$b^2 + x : b = a^2 : a;$$

puisque dans le premier cas le travail calorifique était le travail total; le rapport du travail mécanique au travail total est exprimé par

$$\frac{x}{b^2 + x};$$

et on trouve :

$$\frac{x}{b^2 + x} = \frac{a - b}{a}$$

Or nous savons que 1 grain de zinc consommé donnerait, s'il était utilisé tout entier, un travail représenté par 158; il donnera donc ici :

$$158 \left(\frac{a - b}{a}\right)$$

MM. Joule et Scoresby ont appliqué cette formule à un assez grand nombre d'expériences. Ils ont trouvé en moyenne avec leurs appareils un travail théorique déduit de leur formule de 78 liv. 5 onces par grain de zinc, et celui qu'ils ont réellement obtenu ne va qu'à 65 liv. 6 onces par grain, en sorte que le travail effectif doit être considéré, suivant eux, comme égal aux $\frac{4}{5}$ du travail théorique, dans les conditions où ils se trouvaient.

Cette théorie des électromoteurs, qui ne peut évidemment rien éclaircir sur les perfectionnements à apporter à ces machines, et qui exprime seulement la transformation de la chaleur développée par une action chimique en travail mécanique, permet de comparer immédiatement, sous le rapport de leur utilité, les machines électromotrices avec les machines à vapeur, car, dans celles-ci, c'est aussi la chaleur dégagée par une action chimique qui se transforme en un travail mécanique. Les cal-

culs de MM. Scoresby et Joule et les résultats obtenus déjà par Œrsted et depuis par M. Hunt s'accordent à très-peu de chose près; 1 grain de charbon consommé dans le fourneau d'une machine de Cornouailles, a soulevé 143 livres à 1 pied, tandis que 1 grain de zinc consommé dans une batterie voltaïque ne peut soulever théoriquement que 80 livres. Le prix d'un quintal de charbon est inférieur à 9 pences, tandis que celui d'un quintal de zinc est au-dessus de 216 pences, d'où il résulterait que dans les meilleures conditions, la force magnétique est 25 fois plus chère que celle de la vapeur.

Des recherches ont été faites à ce sujet par M. E. Becquerel, dans le but de constater devant le Jury de l'Exposition universelle, la puissance mécanique et la dépense de quelques électromoteurs; en voici les résultats tels qu'ils ont été exposés par M. Becquerel lui-même.

NATURE de L'ÉLECTROMOTEUR.		ÉTAT DE LA PILE. NOMBRE D'ÉLEMENTS.	Surface totale du zinc de chaque élément.	Travail du moteur sans voltamètre.	Travail du moteur avec voltamètre.	Consommation de zinc par heure et par kilogramètre	Consommation de zinc par heure et par cheval de force.
Appareils.		Éléments.	Décimèt. carré.	Kilogramètre.	Kilogramètre.	Grammes.	Kilogrammes.
MACHINES ROTATIVES.	Appareil Larmenjeat, armatures roulant sur les électro-aimants.	20 simples. Zinc intérr	0,85	0,836	0,720	160	12,000
		10 doubles —	1,70	»	0,484	203	15,200
		10 triples —	2,55	1,028	0,900	60	4,500
		10 quadruples —	3,40	1,280	0,960	61	4,575
	Appareil Loiseau, analogue à celui de M. Jacobi.	10 quadruples —	3,40	2,514	0,863	137	10,250
MACHINES OSCILLANTES.	Appareil Roux.	10 triples —	2,55	0,829	0,562	174	13,050
		10 simples —	0,85	»	0,450	142	10,680
		10 doubles —	1,70	1,052	0,584	144	10,800
		10 triples —	2,55	1,550	0,850	132	9,900
		10 quadruples —	3,40	3,660	1,500	88,7	6,640
		8 Zinc extérr	21,00	1,600	1,330	44,0	3,300
		6 —	21,00	0,600	0,415	28,9	2,200
	Appareil Ferro et Kuemse.	24 simples. Zinc intérieur	0,85	»	0,512	»	»
		12 doubles —	1,70	0,428	»	«	»
		12 doubles —	»	0,402	»	»	»
		12 doubles —	»	«	0,226	422	31,700

Nous remarquerons seulement que M. Becquerel ne paraît pas s'être préoccupé de faire marcher les divers appareils, de façon à leur faire donner à chacun leur maximum de travail, ce qui eût été un élément important dans la détermination de leurs valeurs relatives. On a choisi les quatre appareils qui, d'après leurs dimensions, ont permis d'y adopter un frein dynanométrique. Ces appareils étaient : 1° une machine construite par M. Larmenjeat et déjà citée plus haut; 2° une machine construite par M. Loiseau et analogue à la machine rotative de M. Jacobi, avec cette différence, que les courants, à l'aide d'un répartiteur, ne passent dans les électroaimants en présence que lorsqu'ils sont à peu de distance l'un de l'autre; 3° une machine oscillante imaginée par M. Roux, et dans laquelle des plaques de fer s'approchent et s'éloignent successivement d'électroaimants fixes et verticaux, mais disposés de manière à utiliser l'action magnétique du fil des électroaimants sur une armature en fer doux extérieure; ces électroaimants sont de la forme de ceux que M. Nicklès a nommés trifurqués; les plaques de fer doux ont un mouvement de va et vient qui se transmet à un arbre et donne un mouvement de rotation continu; 4° enfin une machine oscillante construite par MM. Fabre et Kunemann. La quantité de travail a été donnée à l'aide du frein dynamométrique. Afin de connaître la dépense en électricité, on a fait passer le courant électrique circulant dans la machine dans un voltamètre à sulfate de cuivre; le sel a été décomposé, et du cuivre métallique s'est précipité au pôle négatif pendant que l'électrode positive se rongeait. Il y a une petite différence entre le poids du dépôt au pôle — et la perte de poids au pôle +; mais pour les expériences de cette nature elle est insignifiante, et on prend la moyenne des deux déterminations. Or, comme dans chaque élément de pile, le travail chimique est le même que dans le voltamètre, il est donc facile d'évaluer la quantité de zinc dissous dans chaque couple, d'après la quantité de cuivre déposée dans le voltamètre; en multipliant ce nombre par le nombre des éléments de la pile on en déduit la consommation totale du zinc. On peut donc, dans un temps donné, avoir par cette mé-

thode, et la quantité de travail donné par le frein (colonne 5 du tableau ci-dessus) et la dépense indiquée par la consommation du zinc (colonne 6 du tableau). Les éléments de pile employés, sauf dans les deux dernières faites avec l'appareil Roux, étaient des éléments de Bunzen de petit modèle ayant des vases poreux de 125 millimètres de hauteur sur 50 millimètres de diamètre.

§ 3. Application à la télégraphie.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent les tentatives qu'on a faites pour appliquer les propriétés magnétiques du courant électrique à la construction d'un moteur mécanique. Au point de vue de l'économie et de la puissance, ce moteur est très-inférieur à ceux qui sont usuellement employés et en particulier à la vapeur; mais il possède un caractère spécial qui le rend propre à des usages auxquels il peut seul être adapté. Ce caractère, c'est la distance illimitée à laquelle il peut agir. Il est comme un bras qui a le pouvoir de s'allonger indéfiniment pour porter sa main là où il y a une action à exercer. Partout donc où une grande force ne sera pas indispensable, et où il y aura nécessité d'agir instantanément à une distance plus ou moins grande du lieu d'où l'action doit partir, la puissance magnétique du courant électrique deviendra l'une des forces les plus précieuses que la nature puisse nous offrir.

Avant de connaître le pouvoir magnétique du courant électrique, un grand nombre de savants avaient déjà émis l'idée d'appliquer à la télégraphie la faculté que possède l'électricité de se propager instantanément d'une extrémité à l'autre d'un conducteur isolé. Un savant écossais, dont le nom n'est connu que par les initiales G. M., George-Louis Lesage, à Genève, avaient chacun de leur côté imaginé des systèmes télégraphiques qui devaient fonctionner au moyen d'une machine électrique. Mais les inconvénients qui résultent de ce mode de production d'électricité toujours plus ou moins incertain, la complication des moyens proposés, rendirent infructueux les essais nombreux qui furent tentés de 1787 à 1813. Cependant Soemme-

ring, en 1811, avait imaginé la construction d'un télégraphe fondé sur la propriété du courant voltaïque de décomposer l'eau, mais le nombre considérable de circuits électriques qu'exigeait un pareil système, puisqu'il en fallait autant que de signes, le rendait peu praticable; de plus, les indications exigeaient un certain temps pour se manifester. Ce dernier inconvénient était évité dans le système proposé par Ampère, en 1820, après la découverte d'Œrsted, qui consistait à faire usage de l'action instantanée que le courant exerce sur l'aiguille aimantée; mais le premier inconvénient, celui du nombre considérable de circuits nécessaires, subsistait toujours. Toutefois MM. Ritchie et Alexander construisirent à Édimbourg, en 1837, un télégraphe qui était la réalisation du système d'Ampère; seulement en supposant qu'il leur fallait 24 signes, au lieu de 48 conducteurs ils n'en établissaient que 25, un seul étant suffisant pour le retour des courants transmis par les 24 autres. Fechner avait proposé pour rendre l'effet plus sensible sans avoir besoin d'augmenter outre mesure la force de la pile, de se servir du galvanomètre multiplicateur et d'en avoir autant que de signes à transmettre; du reste il avait bien entrevu toute la portée de ce mode de communication.

Shelling eut le premier l'heureuse idée qu'il n'était pas indispensable d'avoir autant de conducteurs que de signes et il montra qu'avec un seul multiplicateur on pouvait transmettre un grand nombre de signaux, en combinant convenablement les déviations de l'aiguille aimantée qui pouvaient avoir lieu tantôt à droite, tantôt à gauche, de manière qu'une déviation à gauche, une déviation à droite, 2 déviations de suite à gauche, 2 à droite, 2 déviations de suite mais la première à gauche, la seconde à droite, 2 encore de suite, mais la première à droite, la seconde à gauche, etc., etc., représentaient des signes conventionnels. Pour éviter que l'aiguille fût par trop fortement ébranlée par ces brusques déviations, Shelling y fixa un petit appendice qui en plongeant dans un godet de mercure amortissait les ébranlements qu'aurait éprouvés l'aiguille. Il joignit également une espèce de réveil à son appareil afin que l'oreille fût avertie du commencement de l'observation; à cet effet, les

choses étaient disposées de façon que le premier mouvement de l'aiguille faisait tomber une balle de plomb sur un levier dont le mouvement détachait l'arrêt d'un réveil ordinaire. Schelling, qui avait fait son premier essai en Russie, en présence de l'empereur Alexandre et plus tard de l'empereur Nicolas, ne put malheureusement réussir à réaliser son système sur une grande échelle.

Un pas important fut fait en 1833 à Gœttingue, par Gauss et Weber, par l'installation de deux fils de cuivre isolés l'un de l'autre, tendus par dessus les maisons entre le cabinet de physique et l'Observatoire; circuit, qui en étant employé avec succès à des communications ainsi qu'à régler les horloges, fit entrevoir la possibilité de transmettre à de grandes distances des lettres, des mots et des phrases. Le courant électrique destiné à établir la communication d'une station à l'autre était un courant d'induction; l'appareil indicateur était un simple galvanomètre multiplicateur dont le fil était mis en communication par ses deux extrémités avec celles du fil de la bobine d'induction. Au moyen d'un commutateur on pouvait diriger le courant d'induction dans un sens ou dans l'autre de manière à obtenir des déviations opposées de l'aiguille du multiplicateur. En combinant d'une manière ingénieuse plusieurs mouvements de l'aiguille, Gauss et Weber parvinrent à produire au moyen de sa déviation tantôt à gauche, tantôt à droite, tous les signes possibles, tant lettres que chiffres. En supposant que pour représenter un signe on aille jusqu'à cinq déviations de l'aiguille, on a déjà un moyen d'obtenir 62 signes différents. Pour amortir les oscillations de l'aiguille, Gauss eut l'idée de placer l'aiguille aimantée dans une cage de cuivre qu'il nomma *l'étouffeur*, procédé fondé sur l'induction et employé plus tard, comme nous l'avons déjà vu, par Weber dans la construction du galvanomètre.

Les appareils de Gœttingue avaient été établis exclusivement dans un but scientifique. M. Steinheil de Munich, sur l'invitation de MM. Gauss et Weber, chercha à les simplifier afin de les rendre plus propres à la transmission des signes. Les changements qu'il introduisit dans le télégraphe qu'il établit en

1837 à Munich, sur l'invitation du roi de Bavière, furent les suivants :

1° Il substitua à la bobine d'induction de l'appareil de Gœttingue une simple machine de Clarke pour développer les courants induits;

2° Il forma son appareil indicateur de deux aimants placés chacun dans un multiplicateur au lieu d'un seul, de manière à avoir un double mouvement avec un seul courant;

3° Il munit les extrémités des aiguilles aimantées de légers appendices de laiton portant de petits godets remplis d'encre d'imprimerie, et terminés par des pointes capillaires qui traçaient à chaque mouvement des aiguilles sur une bande de papier qui se déroulait régulièrement au moyen d'un rouage d'horlogerie, des points disposés à la suite les uns des autres d'une manière convenue, pour représenter les diverses lettres de l'alphabet.

Pour obtenir des signes sensibles à l'oreille, M. Steinheil avait fixé aux extrémités des aimants, au lieu de godets, de petits marteaux qui venaient frapper sur l'un ou l'autre de deux timbres ayant un son différent et qui remplaçaient la bande de papier.

Gauss avait eu la pensée qu'on pourrait se servir des deux rails d'un chemin de fer comme de conducteurs du courant pour le télégraphe électrique. Steinheil ayant fait quelques expériences en vue de réaliser l'idée de Gauss sur le chemin de Nuremberg à Fürth, ne put obtenir un isolement assez parfait des rails pour que le courant pût parvenir d'une station à l'autre ; la grande conductibilité dont il remarqua à cette occasion que le sol était doué, lui fit présumer qu'il serait possible de l'employer comme conducteur, ce qui permettrait de supprimer entre deux stations l'un des fils conducteurs. Les essais qu'il fit pour constater l'exactitude de sa conclusion furent suivis d'un plein succès, et il fit faire ainsi à la télégraphie électrique l'un de ses plus grands progrès, soit à cause de l'économie que produisait la suppression de l'un des fils conducteurs, soit par la facilité qui en résultait pour l'établissement de grandes lignes télégraphiques.

La transmission de l'électricité par la terre avait déjà été obtenue par un grand nombre de physiciens, ainsi que nous en avons donné des exemples dans le premier volume de ce traité; mais M. Steinheil est le premier qui ait constaté ce fait pour l'électricité voltaïque et en vue de son application à la télégraphie. Le conducteur du télégraphe construit à Munich en 1837 était formé d'un fil de cuivre terminé à ses deux extrémités par deux plaques de cuivre enfoncées dans la terre; le courant traversait cette distance avec d'autant plus de facilité qu'on augmentait davantage la surface des plaques enterrées. M. Bain, en 1842, fit un grand nombre d'expériences sur la conductibilité du sol en vue surtout d'employer la terre comme conducteur humide interposé entre les plaques zinc et cuivre d'un couple[1]; il s'assura qu'on obtenait ainsi un courant passablement fort et très-constant. Nous verrons plus tard qu'il réussit à employer ce courant pour faire marcher les horloges électriques. M. Wheatstone fit aussi à peu près à la même époque un grand nombre d'expériences sur le même sujet en étudiant la propagation du courant à travers l'eau de la Tamise.

Nous reviendrons sur les recherches relatives à la conductibilité de la terre quand nous nous occuperons d'une manière plus spéciale des conducteurs destinés à transmettre une dépêche d'une station à l'autre; nous nous bornons pour le moment à la signaler, vu que nous serons appelés bien vite à montrer tout le parti qu'on en a tiré.

Le savant qui le premier a contribué par ses travaux aussi ingénieux que persévérants à donner à la télégraphie électrique le caractère pratique qu'elle possède maintenant, est, sans aucun doute, M. Wheatstone. Cet illustre physicien fut conduit à ce beau résultat par les recherches qu'il avait faites en 1834 sur la vitesse de l'électricité, recherches dans lesquelles il avait employé des fils isolés de plusieurs milles de longueur, et qui lui avaient démontré la possibilité de faire passer par des cir-

[1] M. Gauss avait déjà observé l'apparition d'un courant électrique dans un fil mis en communication avec le sol par de larges surfaces métalliques fixées à ses extrémités.

cuits aussi longs, des courants voltaïques et magnéto-électriques. C'est en 1837, au mois de juin, que M. Wheatstone prit sa première patente. Il employait d'abord cinq fils conducteurs entre deux stations éloignées agissant sur cinq aiguilles aimantées dont les mouvements se combinant deux à deux, ou trois à trois, pouvaient produire plusieurs signes différents. M. Wheatstone s'associa à cette époque avec M. Cooke, qui avait également imaginé un appareil télégraphique ingénieux fondé sur les mêmes principes. Les physiciens anglais avaient joint dès l'origine au télégraphe proprement dit un appareil destiné à appeler l'attention de l'observateur et désigné sous le nom d'*alarme*. C'est une cloche qui sonne sous un marteau de détente qui est subitement relâché par l'action d'un aimant temporaire de fer doux sur lequel on fait agir le courant électrique. Ici le courant n'agit plus d'une manière immédiate pour produire le mouvement; mais il se borne à aimanter par son passage un morceau de fer doux; cet aimant passager attire une autre petite pièce également de fer doux qui empêchait l'action d'un ressort permanent; l'échappement ainsi devient libre, et un mouvement d'horlogerie fait mouvoir le marteau qui frappe le timbre. — On a également tiré un grand parti de ce procédé très-ingénieux pour la télégraphie elle-même. Le principe sur lequel il est fondé renferme un nombre immense d'applications, car il permet à l'homme de mettre en action à quelque distance que ce soit toutes les forces de la mécanique, d'une manière instantanée. En effet, plus tard M. Wheatstone l'appliqua à la construction de son télégraphe à cadran, et c'est ce même principe qui sert de base au télégraphe de Morse inventé à peu près à la même époque.

Avant de passer à l'étude détaillée de ceux des télégraphes dont la pratique a sanctionné le mérite et qui sont universellement adoptés, nous citerons encore le télégraphe électro-physiologique de M. Worsellemann de Heer, fondé sur l'emploi des commotions que le passage du courant détermine dans l'un ou l'autre des dix doigts d'un observateur; celui-ci à un signal donné doit placer les doigts de ses deux mains sur les dix touches d'un clavier, qui, au moyen de dix fils, communiquent

avec les touches d'un autre clavier, sur lesquelles un second observateur fait agir ses doigts. L'observateur qui transmet les signaux a soin de munir ses doigts de gants, afin de ne pas recevoir la commotion qui ne doit être perçue que par l'autre observateur. L'avantage de ce système est de n'exiger l'emploi que de fils fins; seulement il en faut dix, ce qui est un grand inconvénient, mais il en a aussi un autre, c'est que la force du courant destiné à transmettre les signaux doit nécessairement varier avec la sensibilité de l'observateur qui les reçoit.

Nous allons passer à l'examen des principaux télégraphes électriques, en ne nous arrêtant qu'à ceux qui sont maintenant en usage sur les principales lignes télégraphiques. Remarquons d'abord que dans tout système télégraphique il y a trois parties distinctes : les appareils destinés à transmettre et à enregistrer les dépêches, soit les appareils télégraphiques proprement dits, les conducteurs destinés à établir les communications voulues entre les appareils *transmetteurs* et les appareils *récepteurs*, et enfin les instruments producteurs de l'électricité qui sont le plus souvent des piles voltaïques et, dans quelques cas, des machines magnéto-électriques d'induction dans le genre de celles de Clarke. Nous ne nous occuperons pas d'une manière spéciale de ce dernier point que nous avons suffisamment traité dans nos deux premiers volumes; nous nous bornerons à mentionner à l'occasion de chaque système télégraphique que nous serons appelés à décrire, quel est l'appareil producteur de l'électricité qu'on emploie pour le mettre en activité.

On peut classer sous trois chefs les divers systèmes télégraphiques les plus usuels; le premier comprend les télégraphes fondés sur l'action déviatrice qu'exerce le courant sur l'aiguille aimantée; ce sont les télégraphes à aiguilles; le second renferme les télégraphes dans lesquels l'action du courant en aimantant un fer doux, fait marcher un index tel qu'une aiguille destinée à indiquer le signe qu'on veut transmettre; ce sont essentiellement les télégraphes à cadran; on peut placer dans le troisième chef les télégraphes dans lesquels l'action a également lieu au moyen de l'aimantation du fer doux par le courant, mais dans lesquels cette action s'exerce sur des appareils

au moyen desquels les dépêches sont enregistrées de manière qu'il en reste une trace permanente. De ces trois systèmes le premier, et surtout le troisième, sont ceux qui maintenant sont le plus généralement répandus; aussi, obligé de nous restreindre, c'est de ceux-là que nous donnerons surtout une description détaillée.

a. *Télégraphes à aiguilles.*

La partie essentielle du télégraphe à aiguille est un multiplicateur (fig. 372) dont l'aiguille fixée verticalement sur un axe horizontal se meut devant un cadran. Parmi ces télégraphes les uns sont à une seule aiguille, les autres, et ce sont les plus nombreux, sont à deux aiguilles. Le télégraphe à une aiguille (fig. 373) présente un alphabet tracé à droite et à gauche de l'aiguille; quelques lettres exigent jusqu'à quatre mouvements, mouvements qui peuvent être ou tous du même côté ou les uns d'un côté et les autres de l'autre; mais, il faut que le dernier mouvement qui indique une lettre placée à droite soit toujours à droite, et celui d'une lettre placée à gauche, toujours à gauche. Ainsi W est indiqué par quatre mouvements, trois à gauche et le quatrième à droite; L par quatre mouvements, à droite, à gauche, à droite, à gauche. Au-dessous de chaque lettre il y a un signe formé d'une ou plusieurs lignes droites penchées vers la droite ou vers la gauche; quelques-unes de ces lignes diagonales sont entières, les autres n'ont que moitié longueur; le sens de la diagonale est celui de la déviation, et il faut une déviation pour chaque diagonale; la déviation indiquée par la demi-diagonale se fait la première. Pour simplifier, on est convenu de procéder de la manière suivante : on emploie d'abord une, deux, trois, quatre déviations à gauche pour les quatre premiers signaux, puis une à droite avec une, deux, trois déviations à gauche pour les quatre

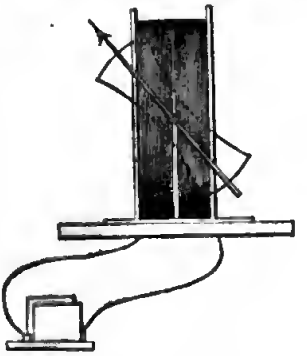


Fig. 372.

signaux suivants; puis deux à droite avec une et deux à gauche, puis trois à droite avec une à gauche, et enfin à droite et à

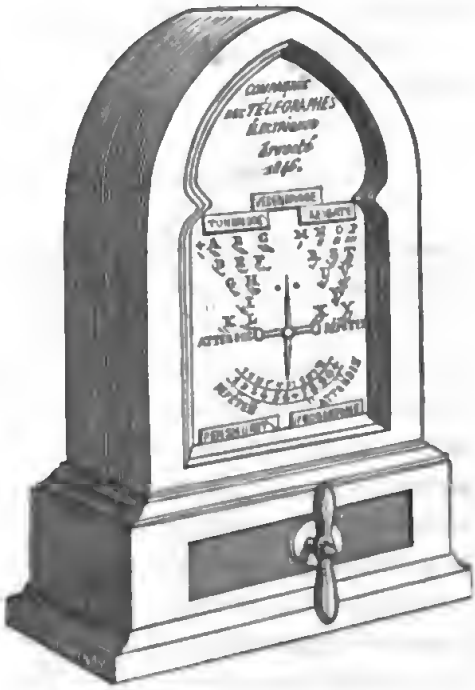


Fig. 373.

gauche, à droite et à gauche, ce qui conduit jusqu'à la lettre L et complète ainsi la première moitié de la série. La seconde moitié est la contre-partie de la première; les déviations à gauche sont simplement remplacées par les déviations à droite et réciproquement. Les chiffres sont inscrits sous l'aiguille, et ils sont indiqués par les mouvements de la partie inférieure. Ainsi pour montrer 4, on porte l'extrémité inférieure de l'aiguille une fois à droite et une fois à gauche.

Le télégraphe à deux aiguilles ne diffère du précédent qu'en ce qu'il se compose de deux multiplicateurs au lieu de n'en avoir qu'un seul. Les deux aiguilles sont également disposées verticalement chacune sur un axe horizontal (fig. 364). La caisse supérieure est occupée par la sonnerie ou alarme. Les lettres de l'alphabet sont rangées sur plusieurs lignes commençant à gauche et finissant à droite ainsi que dans l'écriture ordinaire.

La première série depuis A jusqu'à P figure au-dessus des pointes des aiguilles; la deuxième série, depuis R jusqu'à V,

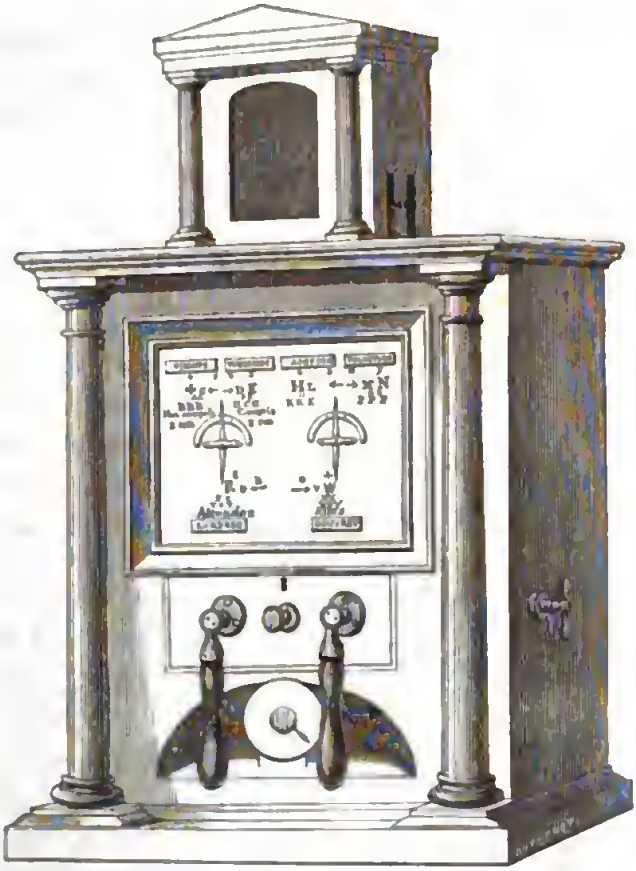


Fig. 374.

figure au-dessous des pointes des aiguilles. Chaque lettre est indiquée par *un*, *deux* ou *trois* mouvements. Les lettres de la série supérieure sont formées par l'aiguille la plus rapprochée qu'on fait tourner une, deux ou trois fois du côté de la lettre de manière à pointer vers elle. Pour les lettres de la série inférieure on remue les deux aiguilles à la fois, en dirigeant leurs extrémités basses vers la lettre. Six lettres C, D, L, M, U, V, exigent deux mouvements contraires de l'aiguille ou des deux aiguilles; d'abord à droite, puis à gauche pour C, L et U; et d'abord à gauche puis à droite pour D, M et V. Ces lettres sont gravées en petites capitales et séparées par de doubles flèches.

Il nous reste à faire connaître maintenant la disposition intérieure du télégraphe à aiguilles; nous nous contenterons, pour simplifier, de décrire celle du télégraphe à une seule aiguille, la disposition du télégraphe à deux aiguilles étant, à une légère modification près, parfaitement semblable. Le multiplicateur dans ces télégraphes (fig. 375) porte, comme dans les multipli-

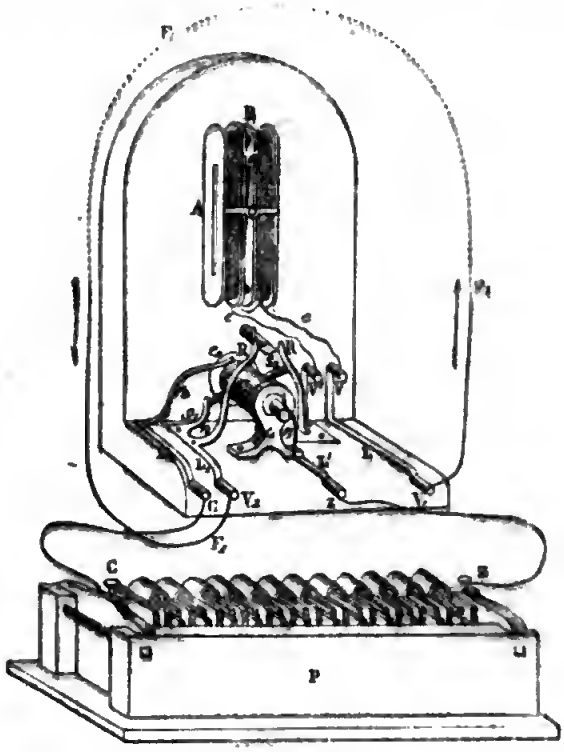


Fig. 375.

cateurs ordinaires, deux aiguilles; l'une *a* intérieure appelée *aiguille diamant*, en forme de losange, très-courte et très-large, l'autre A extérieure, plus longue et semblable aux aiguilles ordinaires. M. Walker a trouvé de l'avantage à substituer à l'aiguille diamant une aiguille formée de plusieurs aiguilles très-courtes, en acier mince et fortement aimantées appliquées contre un disque en ivoire de trois centimètres de diamètre (fig. 376); l'aiguille extérieure a 7 cent. $\frac{1}{2}$ de longueur.

Fig. 376

Le châssis de la bobine B (fig. 375) est en cuivre, ou mieux en bois ou en ivoire; il est fixé par des écrous à une plaque de cuivre vernie du côté de la boîte et appuyée contre sa paroi. Le fil de la bobine a moins d'un quart de millimètre de diamètre; ses deux extrémités e, e' aboutissent aux vis de pression V, V'; une lame métallique L unit l'extrémité e avec une autre vis de pression V_1; e' communique de même par une lame métallique L' avec une vis de pression Z, et par Z avec le pôle zinc de la pile P. Les deux lames L, L' sont entièrement semblables à deux autres, L_1, L_2 que l'on voit à gauche de la figure. Les trois lames L', L_1, L_2 communiquent métalliquement par des ressorts droits, R', R_1, R_2, avec un commutateur C dont nous décrirons bientôt le mode d'action. Les ressorts R', R_2, en acier, pressent fortement contre deux pointes implantées sur une tige de cuivre T, vissée dans la caisse en bois de l'instrument. Un fil conducteur F_1 unit la vis de pression V_1 avec V_2, et le circuit se complète de la manière suivante, entre V_1 et V_2; le courant arrivé en V_1 passe dans la bobine par la droite, revient par la gauche en Z, passe par le ressort R', arrive au cylindre C, vient en V_2 par le ressort R_2 et retourne à V_1 par le fil F_1. Concevons maintenant que le fil conducteur d'une première station communique avec V_1, et le fil de la seconde station avec V_2, l'appareil sera dans le circuit de la ligne télégraphique et tout prêt à recevoir les signaux manifestés par les déviations de l'aiguille ou des aiguilles, puisque deux appareils semblables sont accolés l'un à l'autre, et que leurs bobines sont traversées à la fois par le courant qui va de V_1 en V_2. On est convenu, pour obtenir une régularité plus grande, de mettre toujours en communication avec V_1 le fil conducteur supérieur, et avec V_2 le fil conducteur inférieur.

Voilà comment les signaux sont reçus; disons maintenant comment ils sont transmis. Le commutateur est un cylindre en bois de buis, porté comme l'indique la figure, et qui peut tourner sur lui-même au moyen d'une manivelle; ses extrémités e_1, e_2 sont revêtues d'anneaux de cuivre avec appendices saillants, et isolés l'un de l'autre par le bois qui les sépare. Deux forts ressorts d'acier r_1, r_2, vissés à droite et à gauche sur les

lames L', L_2, appuient avec frottement, l'un sur la virole de cuivre e_1, l'autre sur la virole e_2, et font communiquer les extrémités du commutateur avec les vis de pression Z et C, et par elles avec les pôles de la pile. Un autre ressort plus court r, qui appuie aussi sur la virole e_2 la met en communication directement avec la vis de pression V_2, et par cette vis et le fil F_2 avec la vis de pression V_1. Si l'on fait tourner le commutateur, la saillie s_2 fera soulever l'un des ressorts R', R_2, qui par là même ne communiqueront plus entre eux par le cylindre C. Dans la figure c'est le ressort de droite R' qui est soulevé; mais un petit mouvement de plus imprimé au commutateur fait toucher le ressort r' par la seconde saillie s_2 qui le met en communication avec la virole e_2; alors le courant de la pile circule à travers l'appareil et dans tout le circuit télégraphique. Arrivé en effet en Z, il passera par r' à la virole e_1, entrera dans le multiplicateur V, sortira par V', viendra en V_1, passera par F dans le fil conducteur de la ligne télégraphique, viendra en V_2, passera par r' à la virole e_1, et de cette virole par le ressort r_1 au pôle cuivre C. Si l'on tourne le manipulateur en sens contraire, le courant transmis de Z à la virole e_2 viendra en V_2 par le ressort R et la lame L_1, ira par F_2 dans le conducteur de la ligne télégraphique, viendra en V_1, entrera dans le multiplicateur par V', sortira par V, et viendra par le ressort r correspondant à r', à la virole e_1 et par le ressort r, au pôle cuivre C. La disposition intérieure des ressorts des multiplicateurs est représentée (fig. 377) d'une manière indépendante du reste de l'ap-

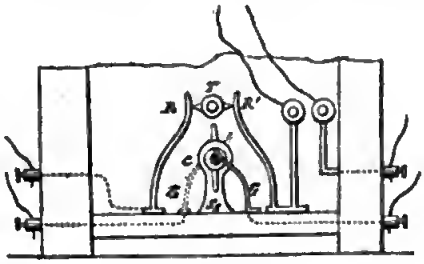


Fig. 377.

pareil, ce qui permet de la mieux comprendre. Les liaisons sont établies de telle sorte, que lorsqu'on tourne la manivelle à

droite l'aiguille *a* est déviée vers la droite. L'aiguille A, placée à l'extérieur de l'appareil, a toujours son pôle nord en haut; l'aiguille intérieure *a* a toujours son pôle nord en bas; de telle sorte que, en vertu de la loi de l'action des courants sur les aimants, si, regardant l'instrument de face, on voit la pointe supérieure de l'aiguille se mouvoir vers la droite, on peut être sûr que dans la moitié du fil la plus près du spectateur le courant est ascendant. Il suffira donc de tourner la manivelle tantôt à droite, tantôt à gauche, pour faire dévier à droite et à gauche toutes les aiguilles des télégraphes et transmettre les signaux.

L'alarme ou carillon destiné à avertir qu'une dépêche va être transmise et qui est placé sur le sommet de la caisse (fig. 374) présente un mécanisme très-simple (fig. 378); *e* est un électro-aimant vu de champ; *a* est l'armature mobile en fer doux, attirée par l'électro-aimant chaque fois et aussi longtemps que le courant passe : deux petits battoirs en cuivre garnis d'ivoire et implantés dans l'armature l'empêchent d'arriver à un contact absolu avec les pôles de l'électro-aimant, tout en lui permettant de s'en approcher de très-près; cette disposition a pour but de prévenir l'adhérence de l'armature de l'électro-aimant, adhérence qui continuait trop souvent, même après la rupture du circuit. L'armature est portée par le petit bras du levier *le*, dont l'autre bras coudé se termine par un crochet destiné à s'appuyer contre les dents de la roue r_1, pour l'enrayer ou l'arrêter dans son mouvement; un ressort faible R butte d'un côté contre un obstacle fixe, de l'autre contre le grand bras du levier *l* tendant à le ramener constamment à la position d'équilibre, ainsi que l'armature *a*. Le ressort du mouvement d'horlogerie, dont la figure ne montre que les pièces principales, est contenu dans le barillet *b* portant

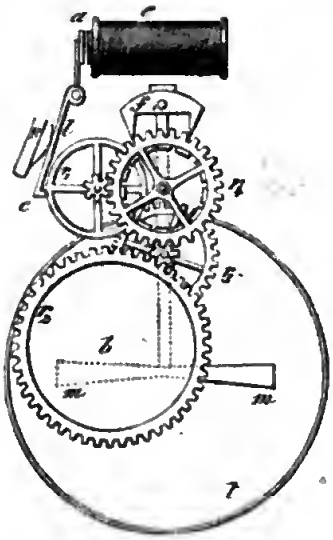


Fig. 378.

la roue dentée r_2; r_3 est une seconde roue dentée dont le pignon engrène avec la roue r_2; r_4 est une quatrième roue mise en mouvement par le pignon de r_3, engrenant avec le pignon de la roue r_1, et en communication avec l'échappement à encre *f*; enfin une tige fixée à l'axe de l'échappement se termine par un double battant, pendule ou marteau à deux têtes *m m*. Le jeu de cet appareil est très-manifeste; quand le courant passe, l'armature *a* est attirée, le levier *l* se porte vers la gauche, le crochet n'arrête plus la dent de la roue r_1, l'action du ressort n'est plus empêchée, toutes les roues tournent, et sous l'influence alternative de la roue d'échappement le marteau frappe rapidement le timbre à droite et à gauche. Le timbre sonnera tant que le circuit restera fermé; mais dès qu'il sera rompu, le ressort R détachera l'armature, le crochet du levier *l* buttera de nouveau contre les dents de la roue r_1, et tout s'arrêtera. Ce n'est pas le courant, comme on le voit, qui meut le battant du timbre, mais bien la force du ressort; le courant n'a pour fonction que de dégager la dent de la roue r_1; rien n'empêche par conséquent que l'on ne puisse faire sonner ainsi de grosses cloches, comme on l'a fait en Angleterre dans les circonstances particulières.

On a modifié de mille manières le mécanisme des carillons; quelquefois le marteau est extérieur et ne frappe qu'un coup : dans la sonnette centrifuge de M. Wheatstone deux marteaux sont fixés aux extrémités d'un levier monté sur l'axe d'une roue. Au lieu du crochet enrayant la roue, c'est quelquefois une pointe qui s'engage dans un trou sur la circonférence de la roue : souvent aussi l'arrêt est un fort ressort entaillé qui retient le bras qui porte le marteau; quand, dans le mouvement de l'armature, le ressort est retiré de l'entaille, le bras tombe et carillonne.

Lorsque l'électro-aimant du carillon se trouve dans le circuit du multiplicateur de l'aiguille du télégraphe, chaque courant qui passe pour produire un signal ferait en même temps sonner, ce qui serait très-désagréable. On obvie à ce grave inconvénient en faisant usage de ce qu'on a appelé *court circuit;* c'est-à-dire qu'on ouvre au courant pour aller au galvanomètre

un chemin plus court que le trajet par l'électro-aimant de la sonnerie. Le court circuit s'établit par le simple mouvement de la poignée qui est à droite (fig. 374). Les deux tiges de cuivre que l'on voit à droite de la figure 374 sur le côté de la boîte de la sonnerie, communiquent, l'une, celle de derrière, avec l'un des fils du multiplicateur de la sonnerie; l'autre, celle de devant, avec l'un des fils du multiplicateur de l'aiguille; elles se continuent dans l'intérieur du télégraphe et descendent jusqu'au niveau de la poignée : la poignée en cuivre de la manivelle communique avec la tige de derrière; l'autre tige se lie métalliquement au ressort R placé sous la poignée. On incruste dans le disque de la manivelle sur lequel frotte le ressort R une pièce d'ivoire. Lorsque la poignée est verticale, le ressort porte précisément sur l'ivoire; la poignée et le ressort sont isolés, les deux tiges ne communiquent entre elles qu'à travers les fils des multiplicateurs de la sonnerie et des aiguilles, le carillon résonne et l'aiguille est déviée; mais si on rend la poignée horizontale, la manivelle communique avec le ressort, les deux tiges sont unies métalliquement; le courant peut aller directement au fil du multiplicateur de la bobine : comme le nouveau chemin est considérablement plus court que le premier, le courant le suivra; et, quoique le circuit du multiplicateur de la sonnerie soit aussi fermé, il n'y passera que fort peu d'électricité, trop peu pour que le carillon résonne.

Nous ne nous arrêterons pas à la description de quelques parties moins importantes des télégraphes à aiguilles, dont le jeu est d'ailleurs facile à comprendre. Nous nous bornerons à mentionner encore un petit appareil que M. Walker, auquel nous avons emprunté les descriptions qui précèdent, a trouvé de l'avantage à joindre à l'appareil principal et qu'il a nommé *appareil silencieux*. Il a pour but quand une dépêche est transmise entre une station extrême et une station intermédiaire, de l'empêcher de parcourir toute la ligne. En effet, si nous prenons pour exemple la ligne télégraphique qui unit Londres à Douvres, le fil isolé sur toute la ligne ne communique avec le sol qu'à Londres et à Douvres, communication qui remplace le fil de retour, tous les appareils des stations intermédiaires étant dans le

circuit; il en résulte que si on transmet une dépêche de Londres à Tunbridge, le courant va jusqu'à Douvres où il trouve la communication avec le sol. Au moyen d'un petit disque à aiguille qu'on voit au bas de la figure 374, on peut imprimer un mouvement de rotation à un cylindre en bois de buis qui est implanté normalement au centre du disque; une lame de cuivre, en communication avec le sol au moyen d'un fil, est incrustée longitudinalement sur le cylindre de bois contre lequel appuient quatre ressorts dont les deux premiers sont liés à deux des fils de la station de Londres et les deux autres à deux fils de la station de Douvres. Il en résulte qu'en tournant le cylindre d'un côté ou de l'autre, on fait communiquer avec le sol soit les deux fils de Londres, soit les deux fils de Douvres; fils qui dans l'état ordinaire sont isolés du sol à Tunbridge. Cette communication possible présente un double avantage; en réduisant la distance parcourue par le courant, elle permet d'agir avec des piles plus faibles, et en confinant les signaux dans une portion des fils, celle comprise entre les deux stations mises en rapport, elle laisse l'autre portion à la disposition des stations qu'elle traverse. Le nom donné à l'appareil provient de ce que, quand on tourne le disque mobile de manière que la pointe de son aiguille soit sur le mot *silence*, on met au moyen d'une lame de cuivre en communication immédiate les extrémités des galvanomètres de l'appareil télégraphique de la station de Tunbridge par exemple; ce qui fait qu'une dépêche qui n'est pas destinée pour cette station la traverse sans affecter les instruments, vu le circuit plus court que trouve le courant au moyen des communications métalliques qui sont établies entre les extrémités respectives du fil de chaque galvanomètre.

Le télégraphe à aiguilles est généralement employé en Angleterre, et pour donner une idée complète de la manière dont il fonctionne, nous sommes obligés d'intercaler ici quelques détails sur le mode de communication qui est établi entre les diverses stations. Les conducteurs destinés à faire communiquer les stations sont des fils de fer de quatre millimètres de diamètre, recouverts en général d'une couche de zinc pour prévenir l'oxydation. Ils sont supportés par des poteaux dits *souteneurs* de

4 mètres 25 à 9 mètres de hauteur, suivant les circonstances, de 4 à 5 centimètres d'équarrissage à la base et de 3 à 4 au sommet; ils sont peints en blanc et goudronnés dans la partie qui entre dans le sol; leur distance moyenne est de 50 mètres. Indépendamment des poteaux souteneurs, il existe de distance à distance des poteaux *extenseurs* dont la distance moyenne est de 400 mètres, destinés, comme leur nom l'indique, à tendre les fils qui, vu leur grande longueur, formeraient sans cela une courbe qui les rapprocherait trop du sol. Il est essentiel que les fils ne soient pas en communication immédiate avec le bois des poteaux qui est conducteur, surtout quand il est humide, parce que les courants seraient déviés; ils passeraient dans les fils voisins ou pénétreraient dans le sol, ce qui occasionnerait de grandes perturbations. Pour les isoler on se sert de supports de différentes formes en terre cuite ou en porcelaine vernie[1], qui sont implantés sur le poteau en bois et sur lesquels on fait passer les fils. Sur les lignes anglaises, on fixe contre le poteau souteneur par des boulons en fer une plaque de bois qui en est séparée par des disques de faïence; la plaque porte elle-même quatre doubles cônes en faïence et retenus par des colliers de fer. Les fils conducteurs traversent l'un de ces doubles cônes et sont ainsi très-bien isolés; un double système

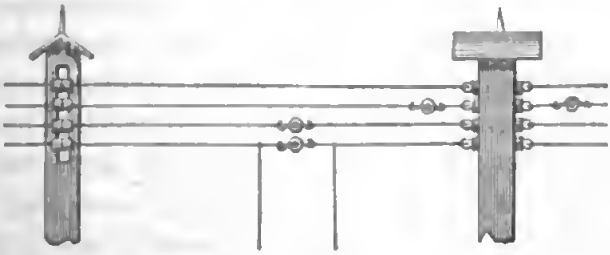


Fig. 379.

de fils passe devant et derrière le poteau recouvert d'un petit toit en faïence ou en ardoise (fig. 379)[2]. Dans la figure le poteau

[1] Nous verrons qu'en Allemagne et en Suisse on emploie en général le verre pour faire les supports isolants.

[2] Pour ne pas compliquer la figure, nous n'avons représenté qu'un des systèmes.

souteneur est à gauche; l'extenseur qui est à droite a un volume plus considérable. Il est traversé par autant d'écrous en fer qu'il y a de fils; chaque écrou porte de chaque côté son *tendeur* composé d'un tambour ou treuil avec roue et encliquetage; les bouts du tendeur sont isolés du poteau par des disques en faïence et les fils viennent s'y attacher des deux côtés; pour compléter le circuit on soude un fil secondaire au fil principal des deux côtés du poteau[1]. La petite pièce qu'on voit à droite et à gauche sur le second fil et au milieu du troisième et du quatrième, et que les Anglais appellent *shackle*, est formée d'un anneau de faïence muni de deux crochets; l'un des crochets est fixé au centre de la poulie, l'autre lui est attenant au moyen d'une attache qui fait le tour de sa circonférence. Ils sont donc isolés l'un de l'autre; il en résulte que le poteau extenseur est en dehors du circuit du second fil, circuit qu'on complète, comme nous l'avons dit, par un conducteur secondaire. Quant au quatrième fil, on voit qu'il part de chacune des deux portions séparées par la poulie isolante, un conducteur, et ces deux conducteurs aboutissent à la station télégraphique où le circuit est fermé soit par l'appareil lui-même, soit par un conducteur secondaire s'il n'y a aucune dépêche ni à recevoir, ni à transmettre.

Le système d'isolement des fils conducteurs que nous venons de décrire présente plus d'un inconvénient; aussi, a-t-on cherché à substituer aux conducteurs aériens des conducteurs souterrains qui sont des fils de cuivre recouverts d'une couche isolante faite en général de gutta-percha; nous reviendrons plus loin, quand nous nous occuperons plus en détail des divers modes de communication des stations télégraphiques entre elles et des précautions nécessaires pour les préserver contre les atteintes de plus d'un genre, qui peuvent les endommager, sur ce système de conducteurs qui non-seulement sont beaucoup

[1] Il n'y a, à chaque poteau extenseur, que la moitié des fils qui soient interrompus; l'autre moitié traverse le poteau, tout en étant isolés au moyen des doubles cones en terre cuite, dont ils traversent l'axe. Il résulte de cette disposition que, puisque les poteaux sont à 400 mètres les uns des autres, chaque fil a 800 mètres de longueur.

plus dispendieux à établir, mais qui dans la pratique ont présenté encore plus d'inconvénients que les aériens, de sorte qu'on y a généralement renoncé, sauf dans les cas où il est impossible de s'en passer, comme lorsqu'il s'agit de traverser des tunnels ou de pénétrer dans les villes.

Si maintenant nous voulons nous faire une idée de la manière dont fonctionne un système télégraphique dans son ensemble, il nous faut prendre une ligne télégraphique particulière, celle de Londres à Douvres, par exemple, placée sous la direction de M. Walker, auquel nous devons la plupart des détails qui précèdent et qui lui-même a introduit dans la manipulation un grand nombre de perfectionnements que lui ont suggérés sa longue expérience et sa connaissance si approfondie du sujet. Cette ligne est une ligne complète et indépendante de toutes les autres; elle s'étend de Londres à Rochester, de Londres à Douvres avec des embranchements à Tunbridge Wells, à Maidstone, etc.; la longueur totale du circuit qu'elle embrasse est de 182 milles anglais. Les stations sont distribuées en groupes de manière qu'il n'y en ait pas plus de six ou sept par groupes. Le groupe le plus important est celui de Londres à Douvres; il exige deux fils, indépendamment du retour par la terre qui s'opère au moyen d'un fil nommé *fil de terre*, qui, partant de l'appareil, est mis en communication avec le sol par l'intermédiaire d'une plaque enfoncée en terre ou d'objets qui y sont naturellement enfouis, tels que les tuyaux de gaz, etc.; ces fils passent par toutes les stations intermédiaires, parmi lesquelles les plus importantes, telles que Tunbridge, Asford et Folkstone, sont pourvues d'instruments, indépendamment de ceux qui sont aux deux stations extrêmes. A chacune de ces stations les fils sont interrompus au moyen des poulies isolantes (*shackles*), décrites plus haut (fig. 379), et des fils conducteurs, partant du fil principal de chaque côté de la poulie, viennent aboutir aux instruments, comme nous l'avons expliqué. Ainsi deux fils suffisent pour établir la communication télégraphique entre Londres, Tunbridge, Asford, Folkstone et Douvres; chacune de ces cinq stations est munie de l'appareil à deux aiguilles; à chaque station intermédiaire

se trouve un fil de terre, aussi bien qu'aux stations extrêmes; nous avons vu son emploi qui permet d'abréger le trajet du courant quand la dépêche ne doit pas parcourir toute la ligne. L'un des deux fils est constamment mis en rapport avec l'alarme, afin qu'on soit averti qu'un message va être transmis; mais une fois l'avertissement donné, le fil est mis en communication avec l'un des deux multiplicateurs de l'appareil, l'autre fil étant déjà en communication avec le second multiplicateur. Nous avons déjà vu qu'on peut éviter que le courant passe dans les multiplicateurs quand on est assuré que la dépêche n'est pas destinée à la station, en lui offrant un circuit plus court. Deux fils sont nécessaires au télégraphe à deux aiguilles; un seul suffit avec le télégraphe à une aiguille, non compris le retour par la terre. Il n'est pas nécessaire, comme nous l'avons expliqué, d'avoir un fil spécial pour l'alarme; toutefois avec le télégraphe à une aiguille qui n'exige qu'un fil, l'on a l'habitude de consacrer le second à l'alarme.

Indépendamment des deux fils qui desservent les cinq stations que nous avons mentionnées, il y a d'autres paires de fils pour les stations d'un ordre inférieur et qui forment différents groupes. Ces fils ne se prolongent pas sur toute la ligne; ils sont interrompus aux stations extrêmes du groupe auquel ils appartiennent. Toutefois il résulte de leur établissement qu'il y a dix fils qui aboutissent à la station de Londres provenant seulement de la ligne qui nous occupe. Cela pourrait faire croire que ces dix fils sont indispensables pour le travail télégraphique; or, comme nous l'avons vu, entre Londres et Douvres, deux seulement sont nécessaires; un seul même suffirait. Mais s'il n'y avait que deux fils pour desservir les 18 stations qui font partie de la ligne, les communications directes entre Londres et Douvres seraient perpétuellement interrompues, ou bien ce seraient les communications avec les stations intermédiaires qui souffriraient; c'est pourquoi les poteaux une fois établis, on a trouvé plus avantageux d'augmenter le nombre des fils, ce qui entraîne une très-faible augmentation de dépense.

M. Walker a imaginé de placer aux différentes stations des sortes de plate-formes tournantes qui sont des espèces de com-

mutateurs destinés à changer à volonté les communications, de manière à pouvoir, en cas de nécessité, se servir pour les stations inférieures, des fils de la ligne principale, comme au moyen des aiguilles on change la direction des convois sur les chemins de fer. Ainsi, à la station centrale de Tunbridge, M. Walker a dans son bureau une plate-forme double qui peut faire communiquer tour à tour son appareil télégraphique avec Londres, avec la ligne de North-Kent, avec Douvres et avec les embranchements. Cette plate-forme est un cylindre ou tambour en bois dans lequel sont incrustées des lames de cuivre et contre lequel s'appuient des ressorts en acier qui communiquent avec les extrémités des fils conducteurs.

Les piles dont on fait usage sur la ligne de Londres à Douvres sont des piles à auge de bois avec plaques de zinc et de cuivre de 16 pouces carrés de surface environ; les compartiments des auges sont séparés par des parois en ardoise, et les cellules sont remplies d'un sable siliceux humecté avec de l'eau acidulée au moyen de l'acide sulfurique et dans lequel plongent les plaques des couples. La figure 375 renferme la représentation de l'une de ces piles. Il est préférable dans la pratique d'augmenter le nombre des couples et de ne faire usage que d'une faible solution acide plutôt que d'en avoir une forte avec un petit nombre de couples. On varie, du reste, le nombre des couples avec la distance qui sépare les stations. Ainsi, pour les groupes de stations entre lesquelles les distances ne sont que 10 à 15 milles, on emploie 24 couples; de Tunbridge, à l'une et à l'autre extrémité de la ligne, ce qui comporte une distance de 40 à 60 milles, il faut 48 couples; de Douvres à Londres il en faut 60. Ajoutons que les zincs sont amalgamés; ils peuvent servir six à huit mois sans avoir besoin d'être amalgamés de nouveau, et même dix à douze si on a soin de bien laver le sable de temps à autre avec un courant d'eau. Tous les télégraphes de la ligne *South-Eastern*, qui est de 182 milles avec 47 stations, sont desservis au moyen de 2,200 couples, et tout le système télégraphique de la Grande-Bretagne en exige 20,000.

Rappelons maintenant en terminant ce qui concerne le télé-

graphe à deux aiguilles, la manière dont on s'en sert. Voici d'abord le vocabulaire complet :

A. Deux mouvements vers la gauche de l'aiguille gauche.
B. Trois mouvements vers la gauche de l'aiguille gauche.
C et 1. Deux mouvements de l'aiguille gauche, le premier à gauche, le second à droite.
D et 2. Deux mouvements de l'aiguille gauche; le premier à droite, le second à gauche.
E et 3. Un seul mouvement de l'aiguille gauche vers la droite.
F. Deux mouvements à droite de l'aiguille gauche.
G. Trois mouvements de l'aiguille gauche vers la droite.
H et 4. Un mouvement vers la gauche de l'aiguille droite.
I. Deux mouvements vers la gauche de l'aiguille droite.
J est omis, on le remplace par G.
K. Trois mouvements vers la gauche de l'aiguille droite.
L et 5. Deux mouvements de l'aiguille droite; le premier à droite, le second à gauche.
M et 6. Deux mouvements de l'aiguille droite; le premier à gauche, le second à droite.
N et 7. Un seul mouvement vers la droite de l'aiguille droite.
O. Deux mouvements vers la droite de l'aiguille droite.
P. Trois mouvements vers la droite de l'aiguille droite.
Q est omis, on lui substitue K.
R et 8. Un mouvement parallèle, vers la gauche, des deux aiguilles.
S. Deux mouvements parallèles, vers la gauche, des deux aiguilles.
T. Trois mouvements parallèles, vers la gauche, des deux aiguilles.
U et 9. Deux mouvements parallèles des deux aiguilles; le premier à droite, le second à gauche.
V et 0. Deux mouvements parallèles des deux aiguilles; le premier à gauche, le second à droite.
W. Un mouvement parallèle des deux aiguilles vers la droite.
X. Deux mouvements parallèles des deux aiguilles vers la droite.
Y. Trois mouvements parallèles des deux aiguilles vers la droite.
Z est omis, on lui substitue S.

Le signe +, appelé *stop* par les Anglais, est le point final par lequel celui qui envoie la dépêche annonce que le mot est fini; il s'indique par un mouvement de l'aiguille gauche vers la gauche. Ce signe sert aussi à celui qui reçoit la dépêche pour indiquer qu'il ne comprend pas; quand il comprend, il montre la lettre E; deux fois E, ou deux mouvements de l'aiguille gauche s'emploient pour dire *oui*.

Les mots *attendez*, *allez toujours*, gravés sur l'instrument, sont d'utiles signaux. Si Londres s'adresse à Douvres quand Douvres est occupé et ne peut prêter attention à la correspondance que Londres veut entamer, Douvres dirige le bout inférieur de ses aiguilles sur la lettre R, et dit par là même : *attendez*. Quand il est redevenu libre et prêt à recevoir le message, il dirige les aiguilles sur W ce qui veut dire : *allez*.

Il est surtout important pour les deux stations qui ouvrent une correspondance de bien s'entendre avant que de commencer. Il faut que celui qui reçoit sache qui lui envoie, et que celui qui envoie un message sache bien si c'est la station avec laquelle il veut correspondre qui le reçoit réellement. On grave au-dessus des six grandes lettres R, C, E, H, N, W, les noms des six stations du groupe, et ces stations seront désormais toujours désignées par ces lettres. Dans l'appareil (fig. 374), R est Londres, C Reigate, E Tunbridge, H Ashford, N Folkstone, W Douvres. Si maintenant Londres veut correspondre avec Tunbridge, il dirige pendant quelques instants son aiguille sur E; chaque mouvement fait sonner le timbre de Tunbridge, qui, comme nous l'avons vu, se trouve sur le même fil que l'aiguille gauche; l'attention de l'employé est éveillée; il fait sortir sa sonnerie du circuit, et transmet à Londres le même signal, ce qui veut dire implicitement : *C'est bien, je suis à mon poste :* Londres est alors sûr d'être attendu à Tunbridge. Il dirige alors l'aiguille sur la lettre R qui désigne Londres, et Tunbridge sait à son tour que c'est Londres qui lui parle, et en répétant ce même signal R, il dit qu'il l'a reçu. Londres alors sonne de nouveau à Tunbridge, la correspondance commence, et Tunbridge montre après chaque mot la lettre E, *compris*, ou la croix +, *pas compris*. Quand la dépêche est achevée, Londres produit deux déviations de l'aiguille gauche vers la gauche; l'employé de Tunbridge les reproduit s'il n'a rien à ajouter, et procède à la transmission de la dépêche à sa destination ultérieure.

Deux employés du télégraphe peuvent modifier leur vocabulaire, de telle sorte que les stations intermédiaires qui voient leurs signaux ne puissent pas les déchiffrer. Ils peuvent conve-

nir, par exemple, que les déviations à droite se liront à gauche et réciproquement, pour l'une des aiguilles ou pour toutes les deux; 2° que l'aiguille gauche deviendra une seconde aiguille droite, ou l'aiguille droite une seconde aiguille gauche; 3° que l'aiguille droite deviendra l'aiguille gauche, et l'aiguille gauche l'aiguille droite, etc., etc.

Les chiffres sont écrits sous certaines lettres, et le signe H suivi d'une croix + indique que c'est le chiffre qu'on va montrer et non la lettre correspondante. Pour éviter toute erreur, le correspondant répète aussitôt le même signe H +, indiquant par là qu'il attend un chiffre et non pas une lettre. La lettre W, interposée entre les chiffres, sert à séparer les fractions complexes ou décimales. Ainsi H E W N signifie ou 43 livres 7 sols, ou 43 pieds 7 pouces, ou 43 heures 7 minutes, etc. Des signaux spéciaux indiquent les périodes, les paragraphes, les mots soulignés, ou d'autres circonstances importantes : les employés ont inventé un signal pour rire et pour exprimer leur étonnement, etc., etc. Les employés anglais sont si bien exercés qu'ils expédieraient les dépêches les plus difficiles, alors même qu'aucune lettre, ou chiffre, ou signal ne seraient indiqués sur le cadran de leur appareil.

On peut, comme on le comprend, disposer facilement le télégraphe à deux aiguilles pour qu'il agisse comme un télégraphe à une seule aiguille, ce qui est fort précieux dans bien des cas, comme, par exemple, lorsque l'un des deux fils nécessaires au télégraphe à deux aiguilles vient à se déranger ou à se rompre ou lorsque ces deux fils viennent, par l'effet d'un violent orage ou d'un accident, à se toucher de manière à n'en faire plus qu'un. Du reste, le télégraphe à une seule aiguille, quoique sa manipulation exige un peu plus de temps, peut rendre de grands services; c'est celui dont on se sert généralement pour les avertissements à donner sur les chemins de fer entre les diverses stations, son emploi présentant plus de simplicité et même dans quelques cas plus de sécurité.

Le télégraphe à deux aiguilles est peut-être le plus parfait de tous en théorie, et quoiqu'il exige l'emploi de deux fils, il mérite la préférence dans le plus grand nombre de cas, soit

à cause de sa simplicité, l'action sur laquelle il repose étant une action directe qui n'exige aucun mécanisme intermédiaire, soit à cause de son infaillibilité qui tient à la même cause puisqu'il est moins susceptible que tout autre de se déranger et de donner lieu à des erreurs. La facilité avec laquelle les manivelles se prêtent aux mouvements à exécuter, et la rapidité qui en résulte dans la transmission des dépêches sont également remarquables. M. Walker, à la suite de sa longue pratique, a observé que dans les cas ordinaires, on transmet facilement douze à quinze mots par minute, que bien souvent quand tout est bien en ordre et que l'isolement est bon, on en transmet dix-sept à dix-huit et même jusqu'à vingt. Ces considérations expliquent pourquoi le télégraphe à deux aiguilles est généralement adopté dans la Grande-Bretagne, pourquoi on le conserve malgré la supériorité évidente que présente, comme nous le verrons, sous certains rapports, le télégraphe de Morse; elles nous serviront également de justification pour les développements étendus que nous lui avons consacrés.

Il existe un autre télégraphe à aiguille imaginé par M. Bain, qui a été installé en 1846 sur la ligne d'Édimbourg à Glascow. Ce télégraphe est à une seule aiguille; cependant le nombre des mouvements nécessaires pour former un signal ne dépasse jamais quatre; c'est un de plus seulement que dans le télégraphe à deux aiguilles, et un de moins que dans celui à une aiguille de Wheatstone et de Cooke, et il a le grand avantage de n'exiger qu'un seul fil. Ce télégraphe repose, comme le précédent, sur l'action qu'exerce sur l'aimant le courant qui traverse le fil d'une bobine, mais la disposition des différentes pièces de l'appareil est très-différente; les deux aimants permanents de forme demi-circulaire sont liés ensemble au moyen d'une tige en cuivre diamétrale, sur laquelle est fixée perpendiculairement à ce diamètre l'aiguille indicatrice qui part de son centre où passe également l'axe de rotation. Les deux aimants demi-circulaires ont leurs pôles de même nom près l'un de l'autre; il n'existe entre eux qu'un intervalle de deux à quatre millimètres; deux bobines sont placées de façon que dans l'état d'inaction les deux pôles voisins des aimants sont également dans

l'intérieur de la même bobine; il en résulte que dès qu'un courant pénètre dans le fil de la bobine l'un des pôles est chassé de l'intérieur de la bobine, tandis que l'autre y pénètre; ce qui produit, suivant le sens du courant, un mouvement de l'aiguille indicatrice ou à gauche ou à droite. Le même effet a lieu sur les deux autres pôles des deux aimants demi-circulaires qui pénètrent également dans l'intérieur d'une seconde bobine. Il est facile maintenant de comprendre qu'au moyen d'un commutateur on peut produire des mouvements aussi nombreux qu'on le veut et qui se succèdent rapidement, soit à droite, soit à gauche, de l'aiguille indicatrice dont on a soin de faire concorder le sens des déviations avec celui du mouvement que la main imprime au bras dont est muni le manche qui fait marcher le commutateur.

On a essayé d'employer pour faire marcher les télégraphes à aiguilles, au lieu du courant d'une pile, les courants d'induction produits par des aimants permanents; il en est résulté des modifications assez notables dans la construction des appareils, mais comme ce même mode de production de l'électricité a été appliqué à d'autres systèmes télégraphiques, nous réunirons dans un même examen l'étude des télégraphes dans lesquels la magnéto-électricité est la force motrice.

b. *Télégraphes à cadran.*

On désigne sous ce nom les télégraphes dans lesquels une aiguille parcourant un cadran par une succession d'impulsions élémentaires de même sens ou en sens contraire, peut s'arrêter pendant un instant très-court, sur un point quelconque, et montrer par conséquent toutes les lettres de l'alphabet ou des signes quelconques. Quelquefois c'est le cadran qui est mobile et qui s'arrête un instant, quand la lettre ou le signe sur lequel on veut attirer l'attention est dans une certaine position convenue. Le plus grand avantage des télégraphes à cadran, c'est que chaque signe est montré directement à l'employé, et que sa perception est le résultat d'un seul instant d'attention; celui qui transmet le signal n'a aussi à imprimer qu'un simple mou-

vement de rotation plus ou moins prolongé pour amener l'aiguille indicatrice sur le signe à montrer à distance, ou le cadran mobile à la place où ce signe doit se trouver. Les télégraphes à cadran sont fondés sur un principe analogue à celui de l'alarme dont nous avons parlé plus haut; c'est toujours un électro-aimant qu'on aimante par le courant qu'on a à sa disposition, qui, agissant sur une armature ou, comme on l'appelle, *un contact* de fer doux, détermine, au moyen de cette pièce de fer doux, un mouvement dans un système de rouages plus ou moins compliqué; mouvement qui est imprimé directement par la pièce en question, ou qui résulte d'un mécanisme étranger à l'électro-aimant, dont l'action est arrêtée et libérée suivant la position de la pièce, comme cela a lieu dans l'alarme. L'inconvénient de quelques-uns des télégraphes à cadran, c'est qu'en général chaque signal y étant dépendant de ceux qui le précèdent, les erreurs peuvent s'accumuler; leur mécanisme est d'ailleurs nécessairement toujours plus ou moins compliqué, ce qui les rend plus susceptibles de se déranger et par conséquent assez difficiles à régler et à maintenir réglés. C'est encore à Wheatstone qu'on doit la première idée du télégraphe à cadran; il en a construit lui-même un assez grand nombre en cherchant à les perfectionner; il n'est pas le seul, car soit en Angleterre, soit en Allemagne, soit en France on en a imaginé une foule plus ou moins ingénieux et plus ou moins parfaits. Obligé de nous restreindre, nous nous bornerons à parler de ceux des télégraphes à cadran dont la pratique a fait connaître la supériorité; nous ne nous étendrons pas même très-longuement sur ce qui les concerne, vu que leur emploi, même des meilleurs, n'est pas très-général comparativement à celui du télégraphe à aiguilles dont nous avons déjà parlé et à celui du télégraphe de Morse dont nous nous occuperons plus tard.

Pour faire bien comprendre le mécanisme du télégraphe à cadran, nous commencerons par décrire le plus simple de tous, qui est plutôt destiné à la démonstration du principe qu'à être employé dans la pratique. Dans ce télégraphe il faut distinguer, comme dans tous les autres, le *manipulateur* et le *récepteur*. L'aiguille du récepteur (fig. 380) est montée sur une roue *a* qui porte

vingt-six dents correspondant aux vingt-cinq lettres de l'alphabet, écrites sur le cadran et au signe + appelé *final*, qui sert de point de repère. Ces dents sont taillées en plan incliné par rapport au rayon et par rapport aux deux chevilles *b* et *d* de l'ancre *b c d* qui reçoit un mouvement de va-et-vient de droite à gauche et de gauche à droite; quand l'ancre va à gauche, la cheville *b* frappe sur le milieu du plan incliné de la

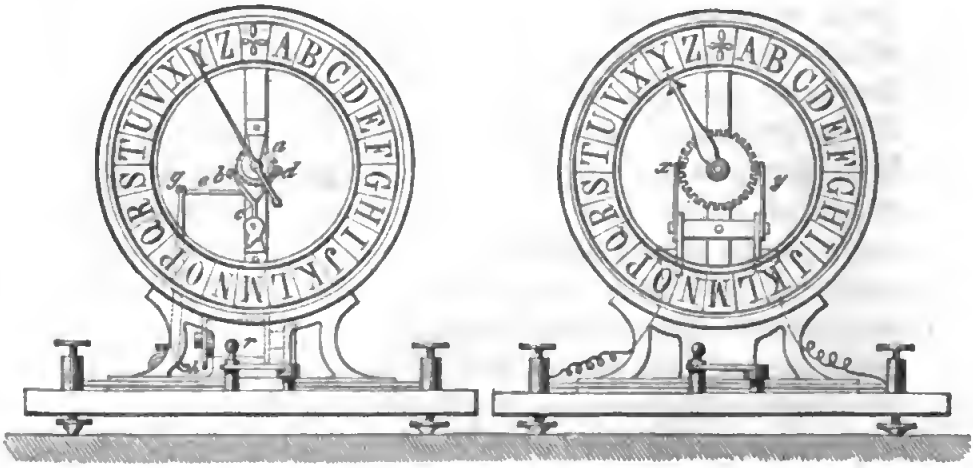


Fig. 380. Fig. 380 *bis*.

dent qu'elle rencontre, et, par la pression, fait avancer la roue d'une demi-dent; quand elle revient, la cheville *b* se dégage et la cheville *d* fait à son tour, par le même mécanisme, avancer la roue d'une demi-dent dans le même sens. Ces mouvements sont imprimés à l'ancre par l'extrémité *g* du levier *g h* qui est attiré à droite par l'électro-aimant *r*, lorsque le courant passe dans son fil, et qu'un ressort ramène à gauche, dès que le courant cesse de circuler. Supposons l'aiguille arrêtée sur le *final*, on l'amènera sur la lettre A en fermant et interrompant une fois le circuit; sur la lettre B, toujours en partant du *final*, en répétant deux fois la même opération et ainsi de suite pour toutes les autres lettres; voici maintenant comment le manipulateur (fig. 380 bis) produit cet effet; il porte un cadran absolument semblable au précédent; seulement son aiguille plus forte se meut à la main et entraîne dans son mouvement

la roue sur la laquelle elle est montée; celle-ci porte vingt-six dents; deux ressorts sont placés à droite et à gauche, l'un y fait l'office du cliquet dans la roue à rochet en empêchant la roue de tourner à rebours et se trouve toujours en contact avec elle, l'autre x ne la touche que par une saillie terminale, lorsqu'une dent passe devant lui; deux fils de communication, dont chacun est lié à l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant du récepteur, viennent s'attacher le premier au pôle positif de la pile, le second au ressort y, tandis que le ressort x communique avec le pôle négatif; il résulte de cette disposition que chaque fois qu'une dent passe devant le ressort x, le circuit est établi et qu'il est interrompu quand ce même ressort se trouve dans l'intervalle qui existe entre deux dents. Ainsi, quand on fait passer l'aiguille du manipulateur d'une lettre à la suivante, il se produit successivement une fermeture puis une interruption du circuit, ce qui fait précisément passer aussi l'aiguille du récepteur d'une lettre à la suivante. Par conséquent si les deux aiguilles sont d'accord et c'est à ceci que sert le *final* sur lequel doivent toujours être arrêtées les aiguilles des deux appareils, lorsqu'ils ne fonctionnent pas, elles passeront ensemble sur toutes les lettres, en les indiquant simultanément, et il suffira pour transmettre un mot d'arrêter un instant l'aiguille du manipulateur sur chacune des lettres qui le composent. Chaque station doit avoir une pile, un manipulateur et un récepteur; l'employé qui reçoit la dépêche tient sa pile et son manipulateur au repos en dehors du circuit; il n'a autre chose à faire qu'à suivre des yeux l'aiguille de son récepteur pour lire ce qu'elle indique. Quand c'est à son tour à transmettre une dépêche, il ôte son récepteur du circuit au moyen d'un commutateur, il y met en même temps sa pile et son transmetteur; il fait sonner l'alarme de la station à laquelle il s'adresse; son correspondant fait une manœuvre inverse et la communication s'établit. L'appareil que nous venons de décrire, excellent pour la démonstration, est inférieur aux autres du même genre pour la vitesse et la sûreté dans la transmission des dépêches; les dérangements dont il est susceptible proviennent de ce que l'ancre d'échappement du récepteur peut quelquefois laisser

passer une dent au lieu d'une demi-dent, à cause de la vitesse d'impulsion, et de ce que la main de celui qui fait tourner l'aiguille du transmetteur n'a rien pour se guider et surtout pour s'arrêter là exactement où elle doit le faire; la moindre incertitude qu'elle éprouve ou en avant, ou en arrière peut produire quelque désaccord entre les aiguilles.

Le premier appareil de M. Wheatstone, quoique moins parfait que ceux qu'il a construits plus tard, ne présente pas cependant les inconvénients que nous venons d'indiquer. Dans cet appareil (fig. 381) l'armature A est attirée par l'électro-aimant E E, dès que le courant passe, et aussitôt qu'il vient à

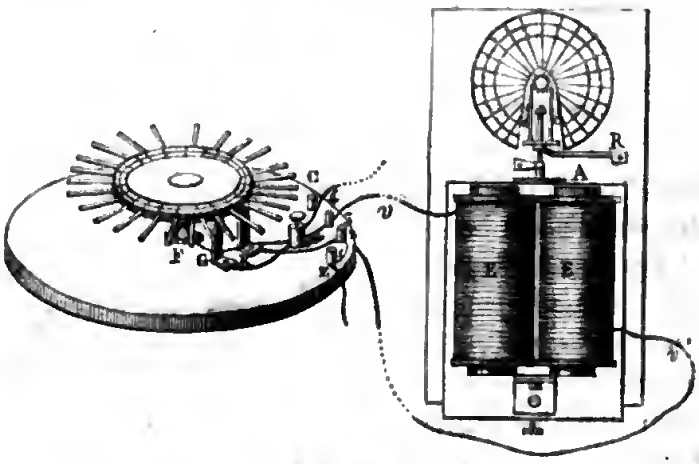


Fig. 381.

cesser, cette même armature poussée par la réaction d'un ressort, retourne à sa première position. En fermant donc et en rompant le circuit alternativement, on fait avancer ou revenir l'armature. Ce mouvement alternatif dans des directions opposées, est transformé en un mouvement circulaire dans une seule direction, par le moyen des deux tiges ou bras de levier *c* et *d*, le bras *d* tirant la dent quand l'attraction s'exerce, et *c* la poussant quand l'attraction fait place à la répulsion; il en résulte que la roue *b*, et par conséquent le disque de papier ou cadran fixé sur elle, avance d'un pas chaque fois que l'attraction ou la répulsion cessent. Sur la circonférence du cadran, on a écrit les lettres de l'alphabet ou d'autres signes, en nombre double du

nombre des dents de la roue d'échappement, c'est vingt-quatre dans le cas actuel (les vingt-quatre lettres de l'alphabet). L'instrument est renfermé dans une boîte qui n'est pas représentée dans la figure; une plaque de cuivre qu'on ne voit pas non plus, placée devant le cadran, porte une petite ouverture qui ne permet de voir à la fois qu'un des signes tracés sur le cadran. On peut amener à volonté chacun des signes devant l'ouverture, en établissant et rompant le circuit un nombre suffisant de fois. Tel est le récepteur, soit *indicateur ;* quant au transmetteur ou manipulateur, il est formé d'un cercle en cuivre se mouvant librement autour d'un pied F, aussi en cuivre; la circonférence du cercle porte douze entailles remplies avec des morceaux d'ivoire ou de bois dur, de telle sorte qu'elle présente des intervalles égaux de substance conductrice et non conductrice, un ressort G presse contre cette circonférence pendant qu'un autre ressort K s'appuie contre un anneau d'ivoire, garni sur son pourtour d'une pièce de cuivre en contact métallique avec le cercle. Quatre vis de pression sont unies par des fils métalliques de la manière suivante : 1 avec 2, 2 avec le ressort K, 3 avec le support F et 4 avec le ressort G. Les deux pôles de la pile sont respectivement unis avec les vis 1 et 4, et les deux fils qui doivent mettre le récepteur dans le circuit avec les vis 2 et 3. La surface supérieure du cercle porte des caractères correspondants à ceux du cadran, et vingt-quatre petites broches destinées à faciliter le mouvement de rotation produit par le doigt. Il y a un arrêt qui empêche que le doigt puisse entraîner le cercle au delà du point voulu. Quand l'appareil ne fonctionne pas, le signe + doit se trouver vis-à-vis de cet arrêt; le ressort G presse contre une des divisions non conductrices de la circonférence du cercle, le ressort K étant toujours appuyé contre la pièce en cuivre placée sur l'anneau en ivoire. Dans cette disposition la pile n'est pas dans le circuit, ce qui permet, s'il y a lieu, aux fils conducteurs qui se trouvent ainsi libres de servir à une communication venant de la station où est le récepteur à celle où est le manipulateur, au moyen d'un appareil semblable, mais disposé d'une manière inverse. Maintenant si on tourne le cercle avec le doigt, le ressort G passe

alternativement sur des divisions conductrices et non conductrices, et le circuit est ainsi tour à tour fermé et rompu, ce qui fait marcher le cadran du récepteur d'autant de dents qu'il y a eu au transmetteur d'interruptions. Si donc tout a été convenablement ajusté, il suffira pour faire paraître une certaine lettre sur le cadran du récepteur, d'appliquer le doigt à la broche correspondante à la même lettre sur le transmetteur et de l'amener jusque devant l'arrêt; ce mouvement déterminera le nombre d'interruptions du circuit, nécessaire pour faire marcher la roue et par conséquent le cadran qui lui est fixé, du nombre de dents voulu pour obtenir le résultat désiré.

M. Wheatstone a imaginé beaucoup de manières de transformer le mouvement alternatif de l'armature en un mouvement circulaire intermittent du cadran. Le mode direct que nous venons de décrire qui est le plus simple, exige un courant trop fort pour pouvoir être employé quand la distance à parcourir par la dépêche est considérable. Aussi dans les appareils perfectionnés et destinés à de longues lignes, M. Wheatstone a lié le cadran à signes à un mouvement d'horlogerie mis en action par un ressort et par un poids, lesquels, lorsqu'il n'y a pas d'empêchement, communiquent à la roue à laquelle le cadran est fixé, une rotation rapide. Mais un mécanisme analogue à l'ancre d'échappement ne permet à la roue de n'avancer que de la distance d'une demi-dent, chaque fois que l'armature est attirée par l'électro-aimant ou repoussée au moyen du ressort auquel elle est liée, quand l'aimantation cesse. L'instrument devient ainsi beaucoup plus sensible et peut agir avec un courant beaucoup plus faible. On conçoit en effet qu'il faille beaucoup plus de force pour donner directement le mouvement au cadran que pour dégager une simple roue d'échappement. C'est également par l'adjonction d'un mouvement d'horlogerie que Wheatstone est parvenu, comme nous l'avons déjà vu à l'occasion de l'alarme et comme nous en verrons plus loin d'autres exemples, à obtenir une multitude d'effets mécaniques.

Le télégraphe à cadran a reçu, comme nous l'avons déjà dit, un très-grand nombre de modifications dont l'une des plus heureuses est celle que lui a apportée M. Bréguet qui a rendu l'instru-

ment d'un usage beaucoup plus sûr et beaucoup plus facile. Il a aussi introduit un mouvement d'horlogerie qui tend à faire mouvoir la roue sur laquelle est posée l'aiguille destinée à parcourir le cadran du récepteur; l'électro-aimant cessé encore ici d'être le moteur; il n'est plus qu'un interrupteur permettant au mouvement d'horlogerie de faire passer une demi-dent de la roue, et l'arrêtant juste au moment où elle est passée, lui permettant de faire passer la demi-dent suivante pour l'arrêter encore et ainsi de suite. Ce qui distingue surtout le télégraphe de M. Bréguet, c'est l'échappement particulier qu'il a mis sous la dépendance de l'électro-aimant pour que celui-ci remplisse bien sa fonction, c'est-à-dire pour qu'il laisse bien échapper juste une demi-dent à chaque vibration de retour. Cet échappement fonctionne au moyen de deux petites palettes montées sur un axe qui est seulement un axe d'oscillation, et qui sont disposées à une distance telle et de manière que la dent de la roue ne peut passer sans les rencontrer, rencontre qui, au moyen du jeu de l'électro-aimant, n'a lieu qu'au moment opportun. Le manipulateur de M. Bréguet est aussi disposé d'une manière ingénieuse qui contribue pour sa part également à remédier à plusieurs des inconvénients du télégraphe à cadran. Nous reviendrons sur ces mécanismes à l'occasion du télégraphe à signes conventionnels, construit également par M. Bréguet.

Mais l'un des plus ingénieux parmi les télégraphes de cette espèce, est sans contredit celui de M. Froment. C'est surtout dans le transmetteur soit manipulateur que se trouvent les perfectionnements imaginés par M. Froment. La figure 382 représente l'ensemble de l'appareil. A B est le manipulateur dans lequel on distingue les 28 touches du clavier, qui forment sa partie extérieure, et qui sont, sous la main de celui qui envoie la dépêche, exactemeut comme les touches du piano sont sous la main du pianiste. Les lettres et les différents signes y sont gravés en même nombre et dans le même ordre que sur le cadran du récepteur C D qui est vu en élévation, mais qui peut être aussi éloigné qu'on le veut du manipulateur. Celui-ci est muni de sa cloche d'appel dont le marteau est mis en mouvement par un électro-aimant particulier très-ingénieusement

disposé, qu'on met en action en pressant une touche du clavier du manipulateur.

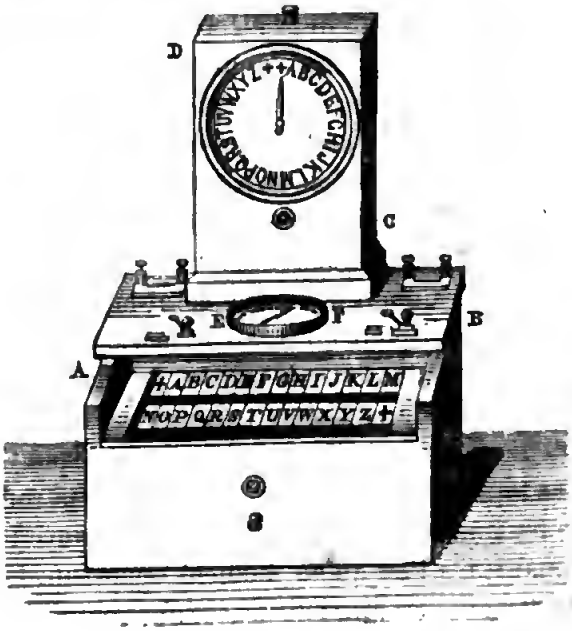


Fig. 382.

La pièce la plus importante du manipulateur est un arbre d'acier droit et très-rigide, qui va d'une extrémité à l'autre de la caisse (fig. 383); sur cet arbre sont implantés autant de bras qu'il y a de touches, c'est-à-dire 28; ces bras, tous égaux et

Fig. 383.

perpendiculaires, divisent en 28 parties égales la longueur de l'arbre comprise entre la première et la dernière touche; ils divisent également sa circonférence en 28 parties égales, formant ainsi la révolution complète d'une hélice. De plus, chaque touche porte au milieu de son épaisseur et dans le point conve-

nable de sa longueur, une cheville d'arrêt sous laquelle le bras correspondant de l'arbre d'acier passe librement quand la touche est dans sa position naturelle, mais contre laquelle il vient heurter et s'arrêter quand la touche est abaissée et pressée par le doigt. L'arbre d'acier est lui-même mis en rotation par un mouvement d'horlogerie et il est muni d'une roue à interruption, comme dans les transmetteurs ordinaires, qui ouvre et ferme le circuit pour chaque tour, un nombre de fois qui dépend du nombre des signes à transmettre[1]; l'aiguille du récepteur marche ou s'arrête suivant que le cylindre tourne ou reste arrêté, quand du moins le circuit est établi. A l'extrémité de l'arbre se trouve une roue en rochet et qui, arrêtée par un levier horizontal, empêche dans l'état ordinaire l'arbre de tourner. Mais, en abaissant une touche on fait mouvoir le levier horizontal qui dégage ainsi la roue en rochet; le mouvement d'horlogerie fait alors tourner l'arbre jusqu'à ce qu'il s'arrête de nouveau quand la cheville correspondante à la touche arrive devant celle-ci. Aussitôt que la touche se relève, le levier horizontal engrène de nouveau la roue en rochet. Ainsi chaque touche fait partir le mouvement d'horlogerie dès qu'on la presse, et celui-ci s'arrête quand le bras de l'arbre en rotation, qui correspond à la touche abaissée, vient à la rencontrer; mais comme l'aiguille du récepteur marche synchroniquement avec l'arbre au moyen de la roue à interruption, il en résulte que cette aiguille, qui s'arrête en même temps que l'arbre, indique alors un signe correspondant à celui qui est marqué sur la touche qui a été abaissée.

Le jeu du télégraphe de M. Froment est en même temps très-rapide et très-exact. La dernière roue du mouvement d'horlogerie tourne avec une grande vitesse, elle fait par exemple 1, 2 et même 3 tours par seconde, et elle imprime par conséquent cette même vitesse à l'arbre d'acier qui la porte. Cette grande vitesse ne nuit point à la régularité de la marche de l'appareil. Ainsi la roue à interruption a sur son pourtour 14 dents et 14

[1] Comme le clavier a 28 touches correspondantes à 28 signes, la roue a sur son pourtour 14 dents et 14 espaces vides.

espaces vides, puisque le clavier a 28 touches et qu'il y a, par conséquent, 28 signes à transmettre; le contact du ressort et d'une dent produit la fermeture du circuit, tandis que le passage d'un vide devant la saillie du ressort produit la rupture. On comprend alors que l'aiguille du récepteur étant sur la marque + il faut, pour que le clavier soit d'accord, que le bras de l'arbre d'acier qui correspond à la touche marquée + soit précisément sous sa cheville d'arrêt; les bras correspondants aux lettres A, B, C, etc., se trouvent ainsi respectivement à des distances de leur arrêt de $\frac{1}{28}$, $\frac{2}{28}$, $\frac{3}{28}$, etc., de circonférence; donc si l'on presse une touche quelconque, on détermine juste la rotation voulue pour que l'aiguille du récepteur vienne s'arrêter sur la lettre correspondant à cette touche, et le même accord se soutient indéfiniment, quelle que soit la vitesse de la rotation de l'arbre. La régularité de la marche est telle qu'on peut passer la main d'un bout du clavier à l'autre d'une manière quelconque, sans ordre ni aucune attention, en pressant même plusieurs touches à la fois, sans que le récepteur et le clavier aient perdu leur accord; en mettant le doigt sur une touche, on voit l'aiguille du récepteur marquer la lettre correspondante, comme si on venait de régler l'appareil.

Nous ne pouvons, ainsi que nous l'avons déjà dit, nous arrêter sur toutes les modifications si nombreuses qu'a éprouvées le télégraphe à cadran; telles que l'emploi de mouvements d'horlogerie marchant synchroniquement aux deux stations et qu'on arrête à l'aide d'actions électro-magnétiques au même instant, telles que la substitution de pièces d'acier aimanté aux armatures ordinaires de fer doux, ce qui fait qu'on peut se passer du ressort destiné à ramener l'armature à sa première position. En effet dans ce cas, les électro-aimants agissent sur l'armature déjà aimantée par elle-même, par répulsion aussi bien que par attraction, suivant le sens du courant; on augmente ainsi la sensibilité de l'appareil, et on est indépendant de l'intensité variable du courant, qui exige qu'on règle le ressort quand les armatures sont de fer doux, pour chaque intensité en particulier. M. Gloësener, qui a employé les armatures aimantées dans la construction de différents systèmes de télégraphes,

y a trouvé l'avantage que présente également, comme nous le verrons, l'emploi des machines magnéto-électriques au lieu de piles, celui de détruire plus rapidement par la production de courants induits, l'aimantation des électro-aimants qui persiste quelquefois quelques instants après que le courant a cessé de passer. Mais, malgré ces divers avantages, nous croyons que si l'on n'a pas adopté généralement les armatures aimantées, c'est que leur aimantation doit s'altérer très-rapidement sous l'action intermittente des électro-aimants.

Tous les télégraphes alphabétiques, soit ceux que nous venons de décrire, soit ceux qui leur ressemblent, peuvent être caractérisés d'une manière générale, en disant qu'ils ont nécessairement un manipulateur qui se meut à la main par celui qui envoie la dépêche, et que par suite, celui qui reçoit la dépêche est obligé de se taire et de rester passif jusqu'à ce que son correspondant lui laisse la liberté de parler à son tour; quant aux différences qui existent entre les divers appareils, elles ne portent que sur le mécanisme qui sert à transformer le mouvement de va-et-vient en mouvement de rotation, ou sur la disposition du cadran, ou sur la forme de l'interrupteur, ou enfin sur le nombre des divisions taut conductrices que non conductrices dont il se compose. Il n'en est pas de même du télégraphe imaginé par M. Siemens, qui diffère totalement des autres en ce qu'il maintient à l'opérateur qui reçoit la dépêche, pendant même qu'il la reçoit et qu'il l'écrit, son action directe et immédiate sur l'opérateur qui la lui envoie, et cela sans avoir recours à un second fil, sans rompre l'accord des cadrans et des appareils, et sans amener la moindre perturbation dans la série des signes dont la transmission est commencée.

Pour réaliser cet avantage, M. Siemens supprime tout à fait l'interrupteur et il dispose son appareil à cadran pour qu'il agisse absolument de la même manière, soit qu'il doive envoyer une dépêche, soit qu'il doive la recevoir. Afin de bien faire comprendre le mécanisme ingénieux au moyen duquel ce résultat est obtenu, nous emprunterons sa description au rapport si remarquable que M. Pouillet a fait à l'Académie des sciences en 1850, sur le télégraphe à cadran de M. Siemens.

L'armature de l'électro-aimant porte un levier d'environ 1 décimètre de longueur qui exerce deux actions très-différentes.

Par la première, il fait passer, à chaque vibration double (aller et retour), une dent de la roue sur l'axe de laquelle est montée l'aiguille indicatrice du cadran, et par conséquent, il porte cette aiguille d'une lettre à la lettre qui suit.

Par la seconde action, il rompt le circuit et arrête le courant dont il a lui-même reçu le mouvement; mais il ne l'arrête qu'au moment où il est lui-même arrêté par un buttoir dans son excursion d'*aller*, c'est-à-dire quand l'armature, attirée par l'électro-aimant, est venue aussi près des pôles qu'elle doit le faire; alors le circuit étant rompu, l'armature cesse d'être attirée, et se trouvant immédiatement rappelée par son ressort, le levier accomplit son *retour*. A peine touche-t-il à cette autre limite de son excursion, qu'il complète de nouveau le circuit, rétablit le courant, et à l'instant se trouve de nouveau emporté par l'armature pour accomplir son deuxième aller, qui, par la même cause, est suivi d'un deuxième retour. Ces vibrations isochrones s'accompliraient ainsi indéfiniment tant que la pile fournirait un courant de même intensité; puis, elles deviendraient plus lentes quand la pile s'affaiblirait, et enfin elles cesseraient, après un temps plus ou moins long, quand l'action du courant serait devenue trop faible pour que la force attractive de l'électro-aimant pût vaincre l'inertie de l'armature et la tension du ressort qui la retient éloignée des pôles[1].

Deux appareils semblables introduits dans le circuit, l'un à Berlin, l'autre à Paris, marcheraient de pair et avec un synchronisme parfait, sauf la vitesse de l'électricité qui peut ici être négligée; et s'ils étaient d'accord au premier instant, c'est-à-dire si les aiguilles correspondaient au même signe, elles feraient des milliers de tours et marcheraient pendant des jour-

[1] Ce système, qui consiste à se servir de l'action magnétisante du courant lui-même pour l'interrompre ou le rétablir, avait déjà été mis en pratique, soit par moi-même dans la construction de l'appareil que j'ai nommé *condensateur électro-chimique*, et que j'ai décrit dans le premier volume de ce Traité, soit par d'autres physiciens, et en particulier par M. Froment dans plusieurs de ses ingénieux appareils.

nées ou des années entières, en se trouvant toujours d'accord, c'est-à-dire toujours au même instant vis-à-vis des mêmes signes.

Aucun opérateur n'est nécessaire; la pile se charge de tout.

Cependant, jusque-là, l'aiguille indicatrice du cadran n'aurait qu'un mouvement régulier et saccadé analogue à celui de l'aiguille à secondes d'une pendule; toutefois il serait bien plus rapide, car l'aiguille indicatrice pourrait faire une révolution entière par seconde, ne mettant qu'un trentième de seconde pour passer d'un signe du cadran au signe suivant, ce qui suppose dans le levier de l'armature, trente vibrations doubles par seconde. Il est vrai que M. Siemens n'essaye ses appareils qu'avec une vitesse moitié de celle-ci, c'est-à-dire un tour en deux secondes, ou une vibration double du levier de l'armature en un quinzième de seconde. Cela ne veut pas dire toutefois que son télégraphe puisse faire 15 signes par seconde ou 900 par minute, car l'œil pourrait à peine suivre l'aiguille; d'ailleurs, avec cette vitesse régulière et uniformément saccadée, elle montre tous les signes également, et fait en dernier résultat la même chose que si elle n'en montrait aucun, puisque l'observateur qui la suit ne peut rien distinguer, rien démêler dans ses mouvements; elle fait à peu près comme quelqu'un qui réciterait l'alphabet plusieurs fois de suite, d'une voix parfaitement réglée et monotone, sans faire sentir aucune lettre en particulier; à coup sûr il serait bien impossible de démêler ce qu'il a voulu dire.

Il faut donc ajouter quelque chose au mécanisme dont nous venons de parler; il faut arrêter l'aiguille dans sa course, non pas longtemps, mais pendant une demi-seconde, un tiers de seconde ou peut-être un quart de seconde, suivant la justesse des mouvements de celui qui envoie la dépêche, et le coup d'œil plus ou moins prompt de celui qui la reçoit, par là l'aiguille montre, choisit, ou si l'on veut, prononce en quelque sorte les lettres sur lesquelles l'opérateur doit exclusivement porter son attention. Pour obtenir ce résultat, M. Siemens adapte circulairement autour de son cadran autant de touches qu'il porte de signes, et sur chaque touche est répété, en caractère très-

apparent, le signe auquel elle correspond. En posant le doigt sur une touche, on abaisse une petite tige verticale de 1 ou 2 millimètres de diamètre, qui vient alors barrer le passage à un levier horizontal parallèle à l'aiguille et monté sur son axe. C'est exactement comme si l'on arrêtait l'aiguille elle-même; mais le mécanisme est caché au-dessous du cadran pour n'en pas troubler l'aspect, et pour ne pas fatiguer l'attention de l'opérateur. Il ne suffit pas que l'aiguille soit bien fidèlement arrêtée vis-à-vis du signe qu'elle doit indiquer, il importe de plus que le levier moteur, lié à l'armature, dont le même obstacle arrête aussi la vibration, se trouve alors vers le milieu de son retour, c'est-à-dire vers le milieu de l'excursion qu'il fait sous l'influence du ressort qui le rappelle. On comprend, en effet, qu'à cet instant le circuit étant rompu depuis un certain temps, et les effets du courant ayant cessé, il y a moins de chance pour que l'armature contracte une polarité magnétique capable de troubler la marche régulière de l'appareil. Ces conditions sont très-habilement remplies par M. Siemens.

Celui qui envoie la dépêche n'a donc qu'une seule opération à faire : poser le doigt successivement sur toutes les touches qui correspondent à la série des signes qu'il veut transmettre. Il abaisse une touche, et l'aiguille indicatrice de son appareil, emportée par le mouvement régulier qui l'anime, n'éprouve rien encore; elle continue sa marche jusqu'à l'instant où elle arrive au signe dont la touche est abaissée; là elle s'arrête. L'aiguille de l'autre station, mue par la même force et soumise au synchronisme, ne peut pas cependant s'arrêter mathématiquement au même instant, car le levier qui la fait mouvoir, rappelé aussi par son ressort, achève forcément son retour, puisqu'il ne rencontre pas, comme son homologue de la première station, un obstacle matériel qui l'arrête; il achève donc son retour, et prend la position où, pour sa part, il complète le circuit et rétablit le courant. Cependant ce qu'il fait là ne peut pas avoir à l'instant même son efficacité, puisque son homologue de la première station est alors retenu en un point où il rompt le circuit. C'est ainsi que l'opérateur qui envoie la dépêche, posant le doigt sur une touche pendant une certaine

fraction de seconde, détermine un instant d'arrêt pareil dans l'aiguille de la seconde station ; mais, il faut bien le remarquer, les deux aiguilles ne peuvent pas s'arrêter au même instant; la seconde ne s'arrête qu'après un temps qui équivaut à peu près au quart de la durée d'une vibration complète. Cette circonstance est importante par l'influence qu'elle exerce sur le nombre des signes qui peuvent être transmis dans un temps donné.

Quand celui qui envoie la dépêche lève le doigt qu'il avait posé sur la première touche pour le porter sur la seconde et faire le deuxième signe, les phénomènes suivants s'accomplissent. Le levier de son appareil, obéissant à l'action du ressort qui le tire, est libre enfin d'achever son retour, et il l'achève en effet. Alors, le circuit étant partout fermé, le courant se rétablit; les armatures des deux stations sont attirées simultanément, et les aiguilles reprennent leur marche concordante jusqu'à l'instant où celle de la première station marque le second signe; l'aiguille de la seconde station le répète à son tour, et les mêmes phénomènes se reproduisent jusqu'à la fin de la dépêche. Si tout se passe bien, l'opérateur de la seconde station n'a autre chose à faire qu'à suivre avec attention les mouvements de son aiguille indicatrice, à écrire ou à dicter les signes qu'elle lui désigne. S'il a un doute, il pose le doigt sur une touche; alors l'aiguille de la première station s'arrête à ce signal, et celui qui envoie la dépêche est ainsi prévenu que son correspondant veut parler; l'entretien s'engage, les explications s'échangent, et bientôt le travail primitif reprend son cours.

L'appareil dont nous venons de donner une idée sommaire se suffit à lui-même; il n'a besoin d'aucun auxiliaire et il ne présente d'autres chances d'erreurs que celles qui peuvent provenir de l'observateur qui a pu se tromper, soit en lisant les mouvements de l'aiguille, soit en écrivant les signes après les avoir lus. Pour éviter jusqu'à la possibilité de ces erreurs, M. Siemens joint au besoin à son appareil une imprimerie qui marche également par une action électro-magnétique dont l'origine est dans une pile locale, pile dont le circuit est fermé pour mettre en activité l'appareil imprimeur, par le courant qui fait marcher le télégraphe lui-même. L'intervention de la pile

locale est nécessitée par le besoin d'avoir pour faire marcher l'imprimerie électro-magnétique un courant électrique plus énergique que celui que requiert le télégraphe même, qui est d'ailleurs déjà affaibli par le trajet qu'il a parcouru d'une station à l'autre. Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur le mécanisme passablement compliqué de cet appareil, comme l'est au reste celui de tous les différents télégraphes imprimeurs qui ont été imaginés avant et après celui de M. Siemens; nous renvoyons, pour l'exposition des principes sur lesquels reposent ces télégraphes, au paragraphe suivant, qui sera consacré aux télégraphes enregistreurs.

Le télégraphe de M. Siemens requiert, pour bien marcher, une perfection d'exécution qui a été réalisée par M. Halske, habile mécanicien de Berlin, mais qui ne peut être en général que difficilement atteinte. Cette circonstance, jointe à la complication et par conséquent au coût élevé de l'appareil, en ont rendu l'emploi peu général; mais elle n'en diminue nullement la valeur théorique qui est encore augmentée par les considérations nouvelles et intéressantes sur la télégraphie électrique, dont son inventeur en a accompagné la description; considérations sur lesquelles nous aurons occasion de revenir plus loin.

C'est encore dans la catégorie des télégraphes à cadran que nous devons évidemment placer celui à signaux construit par M. Bréguet pour l'administration française. Il est destiné à reproduire les mêmes signes que ceux qui étaient donnés par les anciens télégraphes aériens; l'administration des lignes télégraphiques françaises ayant trouvé divers avantages dans cette modification apportée aux télégraphes ordinaires à cadran, d'abord celui d'avoir un personnel habitué à ces signes dont l'usage était consacré depuis un demi-siècle et dont les vocabulaires étaient arrêtés depuis longtemps, ensuite d'obtenir une transmission plus rapide des dépêches, puisque, en se servant des signes anciens, ce sont des mots et non pas seulement des lettres qu'on transmet, enfin de s'assurer par là plus facilement du secret des dépêches. Ce dernier avantage n'est pas très-réel, puisque, ainsi que nous l'avons déjà dit, rien n'est plus facile de l'obtenir avec un télégraphe quelconque, moyennant une

convention préalable analogue à celles qu'on fait pour les correspondances ordinaires, quand elles sont chiffrées. Les deux premiers avantages, quoique plus fondés, ne sont pas toutefois assez grands pour compenser les inconvénients qui résultent de la complication de l'appareil, de la difficulté plus grande de sa manipulation, ainsi que de la nécessité de deux fils télégraphiques et d'un courant électrique très-énergique pour le faire marcher. Aussi croyons-nous que ces télégraphes finiront par être abandonnés totalement comme ils commencent déjà à l'être partiellement en France, qui est le seul pays où ils ont été employés; c'est ce qui fait que nous nous bornerons à en donner une description très-sommaire, malgré l'intérêt au point de vue mécanique que peut exciter la manière aussi habile qu'ingénieuse dont M. Bréguet est parvenu à résoudre le problème dont la solution lui avait été demandée par l'administration française.

Le système télégraphique dont il s'agit consiste en un double télégraphe à cadran, ce qui permet de faire mouvoir deux aiguilles; ces aiguilles doivent prendre chacune huit positions différentes par rapport à une ligne horizontale, positions qui sont par conséquent à 45° de distance les unes des autres. En combinant chacune des huit positions de l'une des aiguilles indicatrices avec les huit positions de l'autre, on obtient ainsi soixante-quatre signes. Les deux aiguilles sont mues chacune par un mouvement d'horlogerie, et portent sur leur axe une roue à échappement munie de quatre dents suffisantes pour obtenir les huit

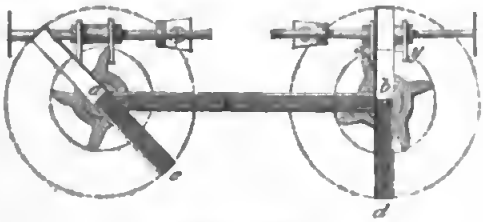


Fig. 384.

positions à donner[1]. L'échappement se fait au moyen d'une ancre mue par un électro-aimant. C'est ce qui est représenté

[1] Ce système est semblable à celui employé par M. Bréguet pour son télégraphe à cadran, dont nous avons parlé plus haut.

dans la figure 384, où l'on voit pour chaque indicateur *a* et *b*, les deux palettes *x* et *y*, une portion de l'arbre oscillant qui les porte et la roue à quatre dents qui fait passer juste une demi-dent ou $\frac{1}{8}$ de circonférence quand l'oscillation du levier dégage une des palettes pour mettre l'autre en prise. Seulement, comme nous l'avons dit, le système est double; comme il y a deux indicateurs qui doivent se mouvoir, d'une manière parfaitement distincte et indépendante, chacun a son mouvement d'horlogerie, son échappement, son électro-aimant et son courant séparé. Il est facile de comprendre d'après cela le jeu de l'appareil qui exige seulement un mouvement d'horlogerie assez puissant et en même temps très-exact, conditions difficiles à concilier, mais qui l'ont été grâce à l'habileté de M. Bréguet.

Passons maintenant au manipulateur qui est composé de deux parties indépendantes semblables à celle de la figure 385; chacune d'elles est en rapport avec un des côtés du récepteur par un fil spécial, ce qui exige, comme nous l'avons déjà dit, l'emploi de deux fils. Les deux manipulateurs sont identiques, de sorte qu'il suffit d'en décrire une.

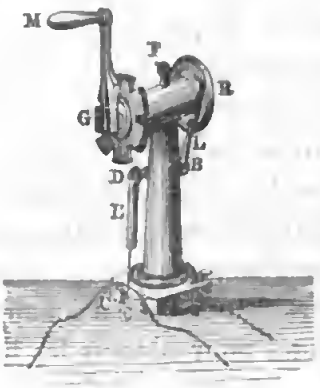


Fig. 385.

G est un disque fixe divisé en huit parties égales par des crans dans lesquels on peut engager une tige fixée à la manivelle mobile M; R est une roue également fixe, sur un côté de laquelle est creusée une gorge quadrangulaire à angles arrondis, dans laquelle se meut un galet porté par la partie supérieure du levier L; BD est l'axe de mouvement des deux leviers L et L'. L est le levier qui porte à son extrémité le galet qui entre dans la roue de la gorge R. L' est le levier qui porte dans le bas une pièce à ressort oscillant entre les deux contacts C et C'; C et C' sont deux contacts métalliques encastrés dans une pièce d'ivoire, sur lesquels vient appuyer le levier L'; C communique avec le pôle de la pile et C' avec le récepteur par un fil conducteur; le fil de la ligne est fixé au bas de la colonne. En

faisant mouvoir la manivelle dans le même sens, autant de fois l'on aura passé devant les crans du disque G, autant de fois le levier L′ aura produit d'interruption du courant par l'effet du jeu des leviers L et L′.

L'ensemble du récepteur et des manipulateurs est représenté dans la figure 386; on ne voit que l'apparence extérieure du récepteur, la forme de la boîte dans laquelle sont les mouvements d'horlogerie et l'échappement que nous avons décrit figure 384; on voit également la face qui est tournée vers l'opérateur, portant en haut, à droite et à gauche, deux petits cadrans qui servent à régler la tension du ressort de chaque armature, puis un peu plus bas le régulateur horizontal fixe et les deux indicateurs dont chacun est monté sur l'axe de la roue à quatre

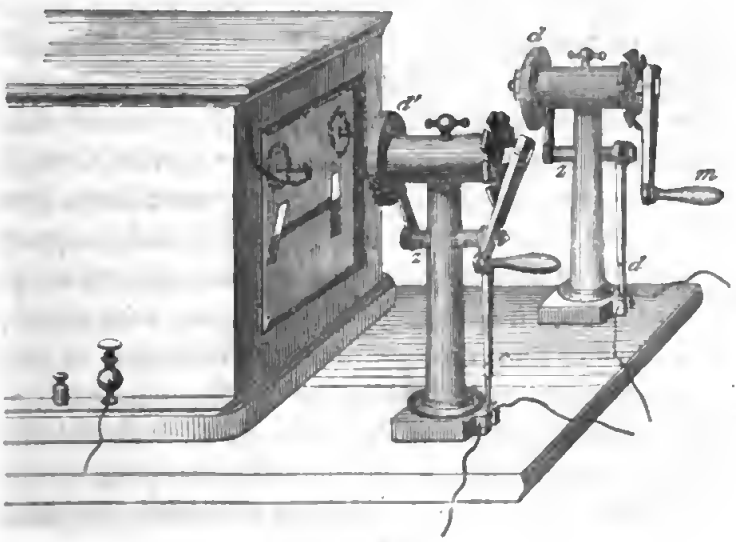


Fig. 386.

dents de la figure 384, afin de se mouvoir avec elle. Les deux manipulateurs sont également représentés dans la figure 386. On prend d'une main le manche *m* qui est articulé, on l'éloigne un peu du cercle *a*, et on le tourne pour le porter dans l'une des huit encoches, où il s'arrête par une cheville qu'il porte. L'indicateur qu'il fait marcher s'arrête aussi dans la même position. Ce que nous venons de dire du manche *m* s'applique

à l'autre, qui agit de son côté de la même manière sur l'indicateur qui est sous son influence. Ainsi les deux mains sont à l'œuvre, et après quelque temps d'exercice, elles acquièrent une habileté merveilleuse dans ce genre d'opération où il faut qu'elles perdent toute habitude de mouvements symétriques. La manœuvre simultanée des deux manches de gauche et de droite fait donc marcher simultanément les deux aiguilles de gauche et de droite du récepteur, aussi bien à la station de celui qui envoie la dépêche qu'à la station de celui qui la reçoit; seulement celui-ci est obligé de mettre et de maintenir son manipulateur hors du circuit pendant tout le temps qu'il reçoit les signes de son correspondant.

Nous avons déjà dit que les télégraphes à cadran exigeaient en général l'emploi de courants passablement énergiques; aussi les fait-on marcher le plus souvent avec des couples de Bunzen. En France, en particulier, ce sont ces couples qu'on emploie avec les appareils télégraphiques à signaux anciens. Il est même nécessaire d'employer des piles composées de plusieurs de ces couples; dans quelques cas, pour assurer le service, il en faut jusqu'à trente, ce qui entraîne une dépense assez forte. Quant aux conducteurs, ce sont en France des fils aériens et supportés par des poteaux en bois et isolés au moyen de supports en porcelaine. En Prusse, où le télégraphe de Siemens a été employé, on s'est longtemps servi de fils souterrains isolés par la gutta-percha; M. Siemens a donné une description détaillée de ce mode de communication qui, du reste, paraît avoir été abandonné, malgré les précautions qu'on avait prises pour le rendre aussi parfait que possible, et les moyens imaginés pour découvrir les points où une communication avec le sol avait lieu, quand par hasard il s'en établissait par l'effet de quelque solution de continuité dans la couche isolante.

c. *Télégraphes enregistreurs.*

Les télégraphes enregistreurs sont ceux qui laissent une trace permanente de la dépêche transmise en l'enregistrant, comme leur nom l'indique, de façon qu'on peut la conserver et la con-

trôler. On conçoit le grand avantage qui en résulte pour le service télégraphique, soit en rendant les erreurs beaucoup plus rares, soit en permettant, quand il s'en glisse, de remonter à leur origine.

Les télégraphes imprimeurs dont nous avons déjà parlé à l'occasion du télégraphe de Siemens appartiennent à la catégorie des télégraphes enregistreurs, mais ce ne sont ni les plus simples, ni par conséquent les plus usuels. Leur but est de fournir toute la dépêche imprimée en caractères ordinaires; ils se composent en général de quatre mécanismes différents : 1° d'un mécanisme compositeur au moyen duquel une roue portant les caractères de l'alphabet gravés en relief présente devant un repère celui des caractères qui est désigné; 2° d'un système pour encrer les caractères; 3° d'un mécanisme imprimeur qui presse la bande de papier sur laquelle doit être imprimée la dépêche contre le type ou le caractère placé devant le repère; 4° d'un gouverneur de la bande de papier propre à la bien diriger et à la faire avancer après chaque impression de lettre, d'une quantité suffisante pour que les impressions ne se superposent pas. La grande difficulté du problème était d'obtenir le fonctionnement de ces divers organes mécaniques sous l'influence d'un même courant, et c'est principalement par les moyens employés pour vaincre cette difficulté que les différents systèmes qui ont été proposés se distinguent les uns des autres. Nous avons déjà indiqué que dans le télégraphe imprimeur de M. Siemens, c'est à l'aide d'une forte pile locale dont le circuit est fermé par le courant qui met en activité le télégraphe à cadran, que marche le mécanisme destiné à opérer l'impression. Mais déjà longtemps auparavant Wheatstone avait le premier imaginé d'écrire les dépêches en recourant à un appareil distinct formé de vingt-quatre bandes ou ressorts portant des caractères en relief et des marteaux qui, en frappant individuellement chaque bande, imprimaient la lettre sur le papier en plusieurs exemplaires. M. Brett avait apporté à ce télégraphe un perfectionnement qui consiste à imprimer la dépêche au moyen d'un second cadran indicateur que l'on passe contre le papier chargé de noir de fumée. Mais plus tard il avait lui-même

imaginé un télégraphe imprimeur dans lequel la fonction du mécanisme imprimeur s'opère à l'aide d'un régulateur à force centrifuge, sous l'influence d'un temps d'arrêt suffisamment tenu pour la transmission de la lettre qu'on veut imprimer. Dans le télégraphe de M. Brett, cette fonction s'accomplit par l'intermédiaire d'un appareil hydraulique dont les mouvements ascendants s'opèrent avec facilité et dont les mouvements des conduits s'effectuent avec lenteur. Dans un système récemment inventé par M. Theiler, le mécanisme télégraphique est en mouvement synchronique avec celui du transmetteur, de sorte qu'il suffit d'arrêter celui-ci en face de telle ou telle lettre pour qu'aussitôt le mécanisme télégraphique soit arrêté et présente cette lettre au mécanisme imprimeur. Or celui-ci se trouve mis en action sous l'influence électrique même qui a déterminé l'arrêt de l'autre mécanisme télégraphique. Dans un système imaginé par M. Dumoncel, le mécanisme télégraphique marche sous l'influence du courant dirigé dans un certain sens, et le mécanisme imprimeur opère sa fonction sous l'influence du même courant dirigé en sens contraire. Il y aurait encore, si nous voulions faire une énumération complète, bien d'autres essais du même genre à citer; mais tous ces appareils sont tellement dispendieux, tellement lents dans la transmission des dépêches, tellement délicats dans leur manœuvre et par conséquent tellement susceptibles de se déranger, que quelque perfectionnés qu'ils soient[1], ils ne deviendront probablement jamais pratiques et qu'on préférera toujours en fait de télégraphes enregistreurs, les télégraphes à signaux simples qui ne nécessitent pas un personnel nombreux et auxquels on peut faire exprimer une langue sténographique très-abréviatrice. C'est donc de ceux-là que nous allons nous occuper, d'autant plus qu'indépendamment de la propriété qu'ils ont d'enregis-

[1] De tous les différents systèmes de télégraphes imprimeurs, celui qui certainement fonctionne le plus rapidement est celui de M. Theiler; il a en outre l'avantage d'être d'une manœuvre très-simple pour l'opérateur. Il ne serait donc pas impossible qu'il pût être employé pratiquement dans quelques cas spéciaux, par exemple quand il s'agirait de fournir un moyen aux aveugles d'écrire eux-mêmes sans avoir besoin de dicter.

trer la dépêche, ils présentent tant d'autres avantages que leur emploi tend à devenir, comme nous l'avons dit, toujours plus général.

C'est en 1837 que Morse fit connaître au public le télégraphe enregistreur, qui, avec raison, a gardé son nom et dont il paraît bien qu'il avait déjà conçu l'idée en 1832. Le principe en est fort simple. Ce télégraphe n'exige qu'un seul circuit, par conséquent qu'un seul fil isolé et le retour par la terre. A l'extrémité du circuit où la dépêche doit être reçue, est un électro-aimant dont le fil communique par une de ses extrémités avec le sol et par l'autre avec le fil isolé qui établit la communication entre les deux stations. L'armature de l'électro-aimant est fixée au bout d'un petit levier dont l'autre bout porte une plume ou un crayon. Sous la pointe de la plume ou du crayon marche, d'un mouvement uniforme, une bande de papier qui est mue au moyen d'un mécanisme. Maintenant, à l'extrémité du circuit d'où part la dépêche est une pile dont l'un des pôles communique avec le sol, tandis que l'autre pôle peut être mis à volonté en communication avec le fil isolé qui relie les deux stations. Si le circuit est fermé, l'armature de l'électro-aimant est attirée, et cette attraction fait que la pointe de la plume ou du crayon touche le papier, et y trace une ligne dont la longueur dépend du temps pendant lequel le circuit est resté fermé. Si celui-ci est fermé et ouvert rapidement, il se produit sur le papier de simples points dont le nombre dépend du nombre de fois que le circuit est interrompu et rétabli. L'espace blanc qui sépare les points et les lignes est d'autant plus grand que le circuit reste ouvert plus longtemps. On voit donc qu'on peut à volonté, en agissant à l'une des stations, tracer sur le papier qui se déroule à l'autre, une succession de points ou de lignes séparés par des intervalles blancs, qui peuvent être combinés de manières assez variées pour donner naissance à des signes correspondants aux différentes lettres de l'alphabet et aux divers chiffres de l'arithmétique. C'est ce qu'a fait M. Morse, et son système de signes a été généralement adopté avec une seule modification, dont la pratique a fait reconnaître la convenance; c'est, au lieu d'employer deux traits l'un plus long que l'autre outre le

point, de n'avoir que deux signes; savoir, une ligne toujours de la même longueur et un point. Nous verrons plus loin comment, au moyen de ce point et de cette ligne, on peut représenter tous les signes dont on a besoin dans la transmission des dépêches. Nous avons supposé dans ce qui précède que la transmission de la dépêche n'avait lieu que dans une seule direction; il va sans dire que pour qu'elle ait lieu dans les deux, il faut double système d'appareils.

Sans nous arrêter aux diverses modifications successives qu'a éprouvées le système de Morse, je le décrirai immédiatement tel qu'il est maintenant pratiqué généralement, en particulier en Allemagne et en Suisse où, grâce aux perfectionnements introduits successivement par M. Steinheil et par M. Hipp, il atteint un haut degré de précision et de rapidité dans la transmission des dépêches. L'appareil enregistreur ou écrivant (fig. 387) repose sur la combinaison de deux appareils essentiellement différents; l'un consiste dans un levier H qui, lors-

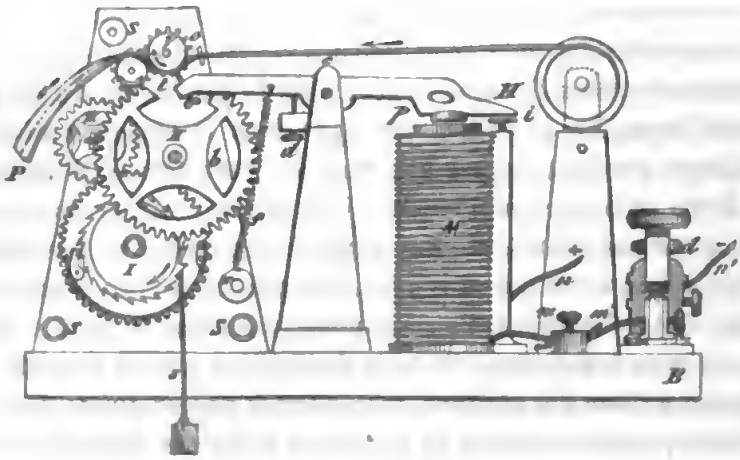


Fig. 387.

qu'on l'abaisse, presse sur une feuille de papier P avec une pointe *t* dont il est muni. Ce levier est abaissé au moyen de l'électro-aimant H qui attire l'armature *p* fixée au levier; chaque fois que le courant passe dans le fil de l'électro-aimant, l'armature entraîne en effet le levier auquel elle est fixée et produit

ainsi la pression de la pointe contre le papier. Une vis *i* sert à limiter le jeu de l'armature et un ressort en hélice *f* joint au levier l'oblige, par son élasticité, à se séparer de l'électro-aimant lorsque le courant cesse d'agir, ce qui fait que la pointe ne presse plus. L'autre partie de l'appareil est destinée à faire passer sous la pointe, avec une vitesse uniforme, une longue bande de papier P qui est enroulée sur un cylindre et qui est à cet effet serrée entre deux cylindres de laiton à surface rugueuse, O et V. Deux ressorts tiennent le cylindre supérieur pressé contre le cylindre inférieur qui est mis en mouvement par un rouage d'horlogerie, au moyen d'un poids *s* auquel on a maintenant substitué avec avantage un ressort ordinaire. Le papier est entraîné entre les deux cylindres par le mouvement du cylindre inférieur et passe ainsi sous la pointe. Quant à cette pointe, après avoir successivement essayé une plume et un crayon, la difficulté de fournir l'encre à la plume et de tailler le crayon y a fait renoncer, pour les remplacer par une pointe en acier très-dur; pour que cette pointe ou plutôt ce style laisse son empreinte sur le papier, on a pratiqué sur le cylindre supérieur V une rainure qui correspond au style; il en résulte que lorsque le levier est attiré par l'électro-aimant, le style atteignant le papier, le presse contre le fond de la rainure, ce qui produit un trait distinct. Si le style ne presse sur le papier que pendant un temps très-court, il ne marque qu'un point; s'il agit pendant un temps plus long, il marque un trait; il peut donc marquer des points et des traits, ce qui suffit, comme nous l'avons dit, pour former un alphabet complet.

Avant de décrire l'appareil transmetteur représenté figure 387 de profil en *d*, nous devons faire connaître un appareil essentiel dans le système télégraphique de Morse; c'est celui qu'on a nommé le *relais*, appareil, du reste, dont on fait usage dans beaucoup d'autres applications du même genre. Le but du relais, c'est lorsque le courant d'une pile transmis à une grande distance par un fil télégraphique est trop faible pour faire fonctionner directement l'appareil récepteur, d'employer ce courant à faire agir sur l'appareil le courant plus fort d'une pile locale; fonction qui n'exige que très-peu de force dans le courant. Or, le

récepteur, dans le télégraphe de Morse, exige, pour fonctionner, un courant assez énergique, et à moins d'employer des piles très-puissantes, ce qui serait fort dispendieux et souvent fort embarrassant, on ne peut le faire agir par un courant transmis d'une station à l'autre. On a donc recours au relais qui consiste (fig. 388) dans un électro-aimant E E dont le fil est mis, par les extrémités F et F', en communication avec la ligne télé-

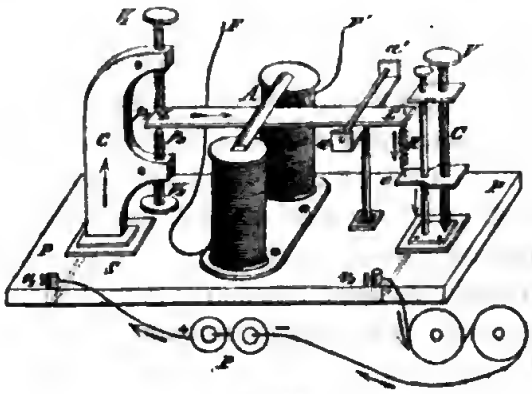


Fig. 388.

graphique; de sorte que cet électro-aimant fonctionne sous l'action du courant transmis d'une station à l'autre. L'armature en fer doux A est attachée à un levier L L mobile autour de l'axe *a a'*; l'extrémité L se meut entre deux vis p_1 et p_2 dont l'une p_1 est terminée par une pointe en ivoire, et l'autre p_2 entièrement métallique communique, au moyen de la colonne métallique C et des conducteurs S *v*, avec le pôle d'une pile locale P; l'autre pôle de cette pile communique, par l'intermédiaire du fil de l'électro-aimant de l'appareil enregistreur et du ressort R, avec le levier métallique L L'. Lorsque le circuit télégraphique ou F F' est ouvert, l'électro-aimant ne fonctionne pas, l'extrémité L du levier s'appuie contre la pointe d'ivoire p_1 par l'effet du ressort R; mais si on ferme le circuit à la station de départ, l'armature A du relais est attirée, L touche la pointe métallique p_2 et le circuit de la pile locale P étant fermé, l'appareil récepteur de la station d'arrivée peut fonctionner. La vis V C' sert à tendre plus ou moins le ressort R pour régler le jeu du relais, suivant

l'intensité du courant[1]. Il est maintenant évident que si la pile locale a une force suffisante pour faire fonctionner le récepteur du télégraphe de Morse, chaque fois qu'il y aura contact court ou prolongé dans le transmetteur de la station de départ, il y aura contact court ou prolongé en p_2 et de même dans le récepteur; ainsi les signaux peuvent se produire par l'intermédiaire du relais aussi bien que directement, seulement le relais permet à la pile locale d'agir pour les former.

Il nous reste maintenant à faire connaître le manipulateur désigné aussi dans ce cas sous le nom de *levier clef*. Il se compose (fig. 387 *d* et fig. 389) d'un petit marteau métallique *v* soulevé par un ressort *r* et qui communique avec un des fils *n*

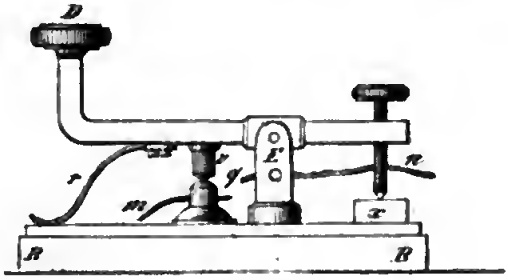


Fig. 389.

du circuit; au-dessous du marteau est une petite enclume métallique *q* communiquant avec l'autre bout *m* du fil du circuit. On peut ainsi, en appuyant avec le doigt en D sur le ressort, fermer le circuit ou le rompre à volonté; si on ne produit le contact entre le marteau et l'enclume que pendant un temps très-court, le courant ne passera que pendant cet instant dans le circuit; en le maintenant au contraire plus longtemps, le

[1] Le ressort est destiné à rappeler les bras du levier dans sa première position, quand l'électro-aimant cesse d'agir; mais il est essentiel, pour qu'on puisse produire un grand nombre de mouvements dans un temps donné, que ce ressort fonctionne rapidement. M. Hipp a proposé pour cela de placer, au lieu d'un ressort, deux ressorts opposés dont on modifie la tension, mais de façon à ce qu'on en laisse prévaloir un qui ramène le levier à la première position; combinaison qui, quand l'appareil fonctionne, donne lieu à un rappel plus rapide que lorsqu'il n'y a qu'un ressort.

courant pourra passer tout le temps dans le fil télégraphique. On voit que le levier-clef est un appareil très-simple ; toutefois on lui a donné une disposition un peu plus compliquée dans le but de lui faire remplir, en même temps que l'office de manipulateur, celui de moyen de communication entre la station d'où vient une dépêche et la station où il se trouve lui-même. On le construit donc de manière qu'il satisfasse aux conditions suivantes : 1° lorsqu'une dépêche est transmise, de laisser ouvert le circuit de la pile locale et celui de la pile *principale*[1] de la station de départ ; 2° dans l'état de repos, de laisser fermé le circuit de la ligne télégraphique afin que le courant de ligne provenant de la station voisine puisse circuler ; 3° de permettre en même temps que ce courant puisse circuler autour de l'électro-aimant du relais de façon qu'au moment où il circule, le circuit de la pile locale soit aussitôt fermé ; 4° enfin, de cesser d'être en communication avec le relais au moment où l'on ferme le circuit de la pile principale de la station, afin que le courant de cette pile aille directement aux appareils de l'autre station sans être obligé de traverser le fil de l'électro-aimant du relais qui est à la station de départ. L'appareil suivant (fig. 390) remplit très-bien les conditions voulues. Sur une petite table en bois T T est une plaque en laiton P P avec deux

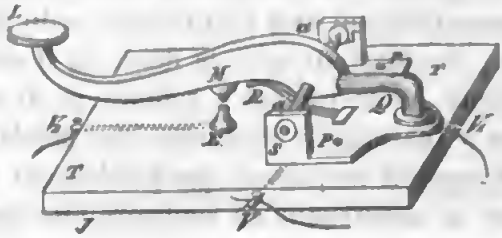


Fig. 390.

supports verticaux métalliques S S, dans lesquels s'engagent les extrémités *a a* de l'axe d'un levier à deux branches L L, toujours en contact métallique avec la plaque P P. Sur l'un des

[1] Nous désignons sous ce nom, par opposition à la pile locale, la pile destinée à fournir le courant transmis à travers le fil télégraphique d'une station à l'autre, qu'on appelle *courant de ligne*.

Digitized by Google

prolongements du levier se trouve un marteau M, au-dessous duquel est une petite enclume métallique E, de laquelle il est tenu éloigné dans l'état de repos par un ressort R. L'autre prolongement du levier courbé à angle droit en Q est alors en contact intime avec un petit cylindre métallique entouré d'un cylindre d'ivoire isolant et communiquant avec la vis de pression V_1. L'enclume communique avec une autre vis de pression V_2, et la plaque P P avec la troisième vis V. C'est à cette dernière vis qu'aboutit le fil de ligne ou le fil de terre, de façon que dans l'état de repos, le courant principal entrant par la plaque arrive par Q à la vis V_1 qui communique avec le relais de la station. Mais si on presse sur le levier de manière à faire toucher le marteau M et l'enclume E, on met en communication le fil de ligne ou le fil de terre avec la vis V_2 qui communique avec l'un des pôles de la pile principale dont l'autre pôle aboutit au fil de terre ou au fil de ligne, et on agit alors sur le relais et par conséquent sur l'appareil télégraphique de l'autre station.

Il nous est facile maintenant de nous représenter la manière dont se fait la communication entre deux stations. Il faut qu'il y ait à chacune : 1° une pile principale et une pile locale; 2° un appareil écrivant; 3° un relais; 4° un levier-clef. Le levier-clef communique à chacune des stations d'une manière permanente avec le sol au moyen d'un conducteur qui part de la vis V en contact avec la plaque métallique P P; il communique par la vis V_1 avec l'une des extrémités du fil de l'électroaimant du relais dont l'autre extrémité aboutit à une pièce métallique à laquelle aboutit également le fil de ligne; cette même pièce est en communication avec l'un des pôles de la pile principale dont l'autre pôle communique avec la vis V_2 du levier-clef. Il résulte de cette disposition que si le levier-clef de la seconde station est baissé, le courant principal de cette station fait agir le relais de la première, puisque son circuit est complet[1]. Ce circuit est

[1] Le courant en effet, partant de l'un des pôles de la pile principale, arrive à la pièce métallique du relais, où il trouve le bout du fil de ligne, parcourt ce fil, puis parvient à la pièce métallique du relais de la première station, traverse le fil de l'électroaimant de ce relais, arrive à la vis V_1 du levier-clef, de là se

par contre rompu dès qu'on presse sur le levier-clef de la première station ; mais alors on met dans le circuit du fil télégraphique la pile principale de cette station qui va agir sur le relais de la seconde, en supposant que son levier-clef soit dans l'état de repos, comme il doit l'être naturellement quand on n'agit pas ; or on n'agit jamais aux deux stations en même temps.

Aux trois appareils que nous venons de décrire, appareil à enregistrer, relais et levier-clef, M. Steinheil en a ajouté un qu'il a nommé *translateur*, qui est destiné à transmettre une dépêche entre deux stations qui ne se suivent pas immédiatement, à travers les stations intermédiaires. Il est indispensable pour cela d'introduire dans le circuit les piles principales de chaque station, car le courant d'une seule de ces piles ne pourrait vaincre la résistance que lui présentent ensemble des conducteurs qui relient deux stations très-éloignées l'une de l'autre. On conçoit que cette opération peut se faire facilement au moyen de leviers-clefs munis d'électroaimant qui, lorsqu'ils sont parcourus par le courant de la ligne, déterminent dans le levier auquel ils appartiennent un mouvement qui ferme le circuit de la pile principale exactement comme cela a lieu quand on presse avec le doigt ; ainsi la dépêche peut être transférée dans une direction ou dans l'autre ; c'est pourquoi on a donné à l'appareil le nom de translateur. Dans l'état de repos, il faut que les translateurs de chaque station unissent avec le sol les extrémités du fil télégraphique compris entre deux stations consécutives ; mais quand on veut que la dépêche traverse les stations intermédiaires pour parvenir directement à une station extrême, il faut que les clefs s'abaissent de manière à rompre la communication avec le sol et à introduire la pile principale dans chacune des lignes partielles qui unissent entre elles les stations intermédiaires. La clef du translateur peut s'abaisser dans un sens ou dans un autre, suivant que la dépêche marche dans une certaine direction ou dans la direction inverse.

rend dans le sol, d'où retournant à la seconde station, il pénètre par le fil de terre dans le levier-clef de cette station, qui étant baissé le conduit à la vis V_2, qui est en communication avec l'autre pôle de la pile.

Mais il est plus simple, comme l'a encore fait M. Steinheil, d'unir le translateur à l'appareil à écrire de Morse, ce qui peut s'effectuer facilement au moyen d'une légère addition à cet appareil. Il suffit en effet d'ajouter à l'extrémité du levier de l'appareil à écrire opposée à celle où est le style, une petite pièce qui vienne en contact avec une au-dessous d'elle au moment où le levier est mis en mouvement par l'attraction de l'électro-aimant. Ce contact, par une disposition facile à comprendre, ferme le circuit de la pile principale de la station où est l'appareil, de manière à transmettre la dépêche à la station suivante et ainsi de suite. La dépêche est ainsi transmise d'une station extrême à une autre extrême, à travers toutes les stations intermédiaires, en laissant dans chacune d'elles sa trace. Il est utile cependant qu'elle puisse passer aussi sans laisser sa trace. On remplit ce double but au moyen d'un commutateur que les employés disposent de façon que, d'après un premier signe parti de la première station, qui indique l'endroit auquel la dépêche est destinée, le courant de la pile locale puisse mettre la pile principale dans le circuit télégraphique sans faire marcher l'appareil à écrire, sauf à la station à laquelle la dépêche doit aboutir.

M. Steinheil, qui a si puissamment contribué au perfectionnement de la télégraphie électrique, avait trouvé convenable de joindre aux piles principales de chacune des stations une résistance considérable dont on pût changer la grandeur sans interrompre le courant. C'est ce qu'il avait obtenu au moyen d'un rhéostat consistant en un fil de laiton très-fin; en choisissant ce fil de manière qu'une longueur de 40 pieds offre à peu près la même résistance que 16,000 pieds ou une lieue du conducteur, on parvient à produire, par des fils de laiton de 400 à 600 pieds de longueur, des résistances égales à celles des conducteurs compris entre deux stations consécutives ou de ce que nous appelons des lignes partielles. Nous ne décrirons pas les détails de ce rhéostat disposé de façon qu'on peut, dans un instant très-court, introduire dans le circuit des résistances équivalentes à une lieue, deux lieues, trois lieues et jusqu'à onze lieues du fil de ligne; un second rhéostat joint au premier per-

met d'introduire également très-promptement des résistances équivalentes à $\frac{1}{10}$ de celles du premier, c'est-à-dire à $\frac{1}{10}$, $\frac{2}{10}$, etc., de lieue du fil de ligne. La nécessité de cette introduction, dans le circuit, d'une résistance variable, tient à l'importance d'avoir, pour agir sur le relais, un courant de force constante, vu que l'appareil une fois réglé par la tension du ressort, il ne marche plus bien si le courant devient plus ou moins intense que celui sous l'influence duquel il a été réglé. Or le courant qui met les appareils en mouvement est variable, car son intensité dépend de l'état de la pile, qui, même dans les piles les plus constantes, peut varier, et surtout de l'isolement du fil de ligne qui change avec le degré d'humidité de l'air et des supports. Il faut donc chaque jour faire varier la résistance additionnelle provenant de l'introduction du rhéostat dans le circuit, de manière à avoir un courant toujours, autant que possible, de même intensité, ce dont on juge au moyen d'une boussole entourée d'un fil galvanométrique qui fait partie du circuit principal et dont chaque station est pourvue.

La rectification de la force du courant règle la marche des appareils et elle apprend en outre à connaître l'état de toute la ligne, car les pertes de courant sont d'autant plus fortes, et par conséquent l'isolement du fil de ligne d'autant plus imparfait, qu'il faut davantage augmenter la déviation de la boussole à la station de départ, en y diminuant la résistance, pour obtenir à l'autre station la déviation qui correspond au courant normal sous l'action duquel les appareils doivent marcher. Malgré les avantages incontestables du rhéostat, nous verrons cependant dans un instant que l'expérience a montré qu'on pouvait s'en passer sans inconvénient, et qu'il était plus simple et plus commode de régler les appareils chaque jour, suivant l'intensité variable du courant, en tendant plus ou moins les ressorts des relais.

Avant d'aller plus loin et d'indiquer par quelques détails pratiques la manière de se servir du télégraphe de Morse, il est temps de faire connaître la nature des signes, soit l'alphabet dont on est convenu de faire usage. Comme nous l'avons déjà dit, les signes sont au nombre de deux : un point et une

ligne; et c'est en les combinant deux à deux, trois à trois et quatre à quatre qu'on parvient à obtenir en tout 30 indications différentes correspondant aux lettres de l'alphabet et à quelques diphthongues. Voici le tableau de ces combinaisons mises en regard des lettres qu'elles représentent, ainsi que des chiffres pour lesquels on emploie cinq signes.

LETTRES.	SIGNES.	CHIFFRES ET PONCTUATION.	SIGNES.
a	.—	1	.————
à	.—.—	2	..———
b	—...	3	...——
c	—.—.	4	....—
d	—..	5	.....
e	.	6	—....
f	..—.	7	——...
g	——.	8	———..
h	....	9	————.
i	..	0	—————
j	.———		
k	—.—	.	.....
l	.—..	;	—.—.—.
m	——	,	.—.—.—
n	—.	:	———...
o	———	?	..——..
ô	———.	!	——..——
p	.——.	«	—....—
q	——.—	Apostrophe.	.————.
r	.—.	Trait de division.	———————
s	...		
t	—		
u	..—		
ü	..—.—		
v	...—		
w	.——		
x	—..—		
y	—.——		
z	——..		
ch	————		

Nous avons vu que le style de l'appareil écrivant est en contact avec le papier aussi longtemps qu'on tient le levier-clef abaissé; la longueur des traits tracés par le style est proportionnelle au temps de l'abaissement du levier-clef, et l'intervalle entre deux traits dépend de la durée des pauses entre deux abaissements successifs. Mais la production successive de points

et de traits par l'abaissement de la clef, exige un mouvement mesuré, rhythmique, sans lequel il est impossible de tracer d'une manière régulière les signes successifs; car le temps est la mesure de longueur de chaque signe, et il faut, par conséquent, employer la mesure naturelle que nous possédons pour le temps, qui est le rhythme. Pour bien apprendre le jeu du levier-clef, il est donc nécessaire de s'exercer à l'abaisser en mesure. Dans ce but on frappe sur une table avec le bout de l'index de la main droite de deux manières différentes : 1° en retirant le doigt avec rapidité, de sorte qu'il n'appuie sur la table qu'un instant, et en ne le relevant que d'un centimètre; 2° en laissant le doigt appuyé sur la table pendant le temps qui sépare deux coups de la première espèce et en l'élevant pendant un temps égal. On mesure chaque battement de la première espèce par la syllabe *di* qu'on prononce en faisant le battement; quant aux battements de la seconde espèce, c'est en prononçant les syllabes *do-o* qu'on les mesure. Les battements que l'on fait en prononçant les *di* produiraient des points, et ceux qu'on fait en prononçant *do-o* donneraient des traits, si l'on avait appuyé le doigt sur le levier-clef qui met en mouvement l'appareil à écrire de Morse; mais il vaut mieux apprendre d'abord le service du télégraphe sans appareils, et seulement en s'exerçant à frapper sur une table, de la manière que nous avons indiquée. Il faut ensuite s'exercer à produire un trait et deux points, puis deux points et un trait et ainsi de suite, en prononçant toujours pendant les mouvements du doigt les syllabes *di* et *do-o*, chaque syllabe devant se prononcer à égale distance de la suivante. On voit qu'il s'écoule des intervalles de temps égaux entre deux points, d'un point au trait suivant, du commencement du trait à la fin et de la fin du trait au premier signe suivant. Chaque point ne demande qu'un seul intervalle de temps, tandis que le trait en demande deux. On a eu égard, dans la formation des groupes qui résultent de la combinaison des points avec les traits pour la représentation des différents signes, au nombre des intervalles de temps, de manière à en avoir le moins possible.

Après un peu d'exercice on parvient facilement à écrire distinctement douze ou quatorze mots dans une minute et à en lire

un nombre double dans le même temps; seulement, il est essentiel que le levier-clef n'ait qu'un jeu très-limité, afin que les *do-o* ou les battements du levier-clef, quand il s'abaisse et se relève, se suivent à des intervalles égaux. On arrive assez vite à distinguer par l'ouïe les traits des points, le levier-clef faisant un bruit semblable à *tri-tri-tri* pour les points et à *do-o* pour les traits; on réussit aussi à les distinguer, soit à la marche du relais, soit à la marche du levier de l'appareil à écrire. Les employés peuvent donc comprendre la correspondance envoyée, seulement par la marche de l'appareil et l'écrire pour ainsi dire sous sa dictée, en même temps qu'elle s'enregistre, ce qui, dans beaucoup de cas, est très-avantageux.

Nous ne nous arrêterons pas à décrire la distribution des stations et la disposition des lignes, points sur lesquels nous reviendrons plus loin et qui sont indépendants du procédé télégraphique employé. Nous nous bornerons seulement à remarquer que dans le système de Morse, où il est très-important que les relais marchent sous l'action d'un courant d'intensité aussi uniforme que possible, on a soin de diviser les lignes *principales*, autant que faire se peut, en lignes *partielles* d'une longueur telle que le courant y ait sensiblement la même intensité d'un bout à l'autre; ces lignes partielles unissent les stations principales qui sont toutes munies d'appareils complets pour recevoir et transmettre les dépêches, de sorte que lorsqu'une dépêche doit aller au delà, la pile principale est mise dans le circuit de la ligne au moyen du translateur pour agir sur le relais suivant. Or, si les piles principales sont semblables à chaque station principale ainsi que les résistances des lignes partielles, on conçoit que les relais marchent tous sous l'action d'un courant de même intensité à peu près. Cependant, malgré cette précaution, des circonstances variables telles que l'humidité de l'air, l'imparfait isolement qui en résulte pour les fils, soit par l'air lui-même, soit par les poteaux, le contact accidentel d'un fil avec quelque objet extérieur tel que les feuilles d'un arbre, peuvent affaiblir le courant entre deux stations intermédiaires. Aussi est-il nécessaire, comme nous l'avons déjà dit, de régler tous les jours les appareils.

Parmi les opérations qui servent à régler les appareils, nous ne nous arrêtons pas sur celles qui consistent à préparer la pile, à rectifier chaque appareil, afin de s'assurer qu'il joue bien, que les ressorts sont convenablement tendus, que les points de contact ont toujours une surface bien nette dans le relais et dans le levier-clef, que la bande de papier marche bien dans l'appareil à écrire, que le style est bien à sa place, etc., etc. Nous nous bornons à insister sur l'opération qui consiste à régler la force du courant. Nous avons déjà dit que c'est au moyen de l'introduction permanente d'une grande résistance par l'effet d'un rhéostat, dans le circuit de la pile principale, que M. Steinheil obtenait chaque jour le courant de la force voulue. Ce moyen a été abandonné dans plusieurs lignes télégraphiques où l'on se borne à faire varier le nombre des couples en se guidant approximativement d'après l'expérience acquise. C'est en particulier ce que M. Hipp fait maintenant en Suisse où l'on règle le courant le matin de chaque jour pour toute la journée, en ôtant ou ajoutant quelques couples à la pile sans avoir besoin d'apporter aucun dérangement bien sensible aux appareils.

Au reste, M. Hipp a apporté quelques autres modifications dont une longue pratique lui a fait sentir la convenance, au système télégraphique tel qu'il a été institué en Suisse par M. Steinheil. Sur 23 translateurs qui avaient été primitivement placés dans le réseau télégraphique de la Suisse, M. Hipp n'en a laissé que 11 et il a trouvé qu'il en est résulté une grande amélioration dans le service. C'est à la suite de recherches très-intéressantes sur les fonctions du translateur et sur le rapport qui existe entre la force de l'électricité et la rapidité du mouvement des ancres, qu'il a été conduit à cette diminution considérable dans le nombre de ces appareils. Mais ce que ses nombreuses expériences sur ce sujet lui ont surtout démontré, c'est l'excessive importance d'avoir toujours des courants de force semblable, et c'est pour obtenir ce résultat qu'il a proposé le système suivant qui chemine avec beaucoup de succès en Suisse, et qui pourrait être également appliqué à d'autres pays avec quelques modifications dépendantes de l'étendue et de la distribution du réseau télégraphique.

Tous les matins[1], avant que le service commence, à une minute désignée d'avance, le bureau central de Berne appelle tous les bureaux des stations principales et donne un courant constant qui parcourt ces bureaux dans l'ordre suivant : *Zofinque*, *Zurich*, *Saint-Gall*, *Coire*, *Bellinzone*, *Lucerne*, *Zurich* (2me fois), *Bâle*, *Chaux-de-Fonds*, *Lausanne*, *Genève*, *Lausanne* (2me fois) et *Berne* le point de départ. Le temps perdu par l'effet du mouvement des leviers et ancres des translateurs est d'une $\frac{1}{5}$ seconde. Le courant que chaque bureau reçoit de celui qui précède doit être enregistré. Après cette première opération, les bureaux principaux font de même avec les bureaux intermédiaires qui constituent leur arrondissement ; le résultat doit aussi en être enregistré par chaque bureau principal, et chaque semaine ces registres sont envoyés au bureau central où ils sont examinés. Au moyen de cette organisation on a l'avantage chaque jour : 1° de savoir l'heure exacte (temps moyen de Berne) à chaque station ; 2° de connaître l'état des lignes avant que le service ne commence ; 3° de contrôler l'état des piles ; 4° d'être sûr que les employés sont tous à leur poste.

Il résulte de cette organisation que les bureaux intermédiaires sont obligés de donner leurs dépêches en lignes ouvertes, c'est-à-dire de façon qu'elles parcourent toute la ligne partielle[2] dans laquelle le bureau intermédiaire est compris. De cette manière le courant garde toujours la même force, puisque la résistance reste toujours constante. Mais aussi le bureau intermédiaire, dès qu'il parle, occupe toute la ligne comprise entre deux bureaux principaux, ce qui fait qu'il n'y a pas possibilité à ce que deux bureaux intermédiaires situés sur cette ligne puissent donner leur dépêche en même temps. C'est un inconvénient, il est vrai, mais petit à côté des avantages qui résultent de ce que deux bureaux intermédiaires ne peuvent parler entre eux sans être contrôlés par les bureaux principaux,

[1] Le service télégraphique en Suisse n'a pas lieu pendant les vingt-quatre heures du jour, mais seulement de sept heures du matin à huit heures du soir.

[2] Nous entendons par ligne partielle, celle qui est comprise entre deux bureaux principaux.

de l'impossibilité qu'il y a à ce qu'un bureau reste ouvert par oubli, de ce que lorsqu'une dépêche arrive à un bureau principal pour être transcrite au delà, on sait tout de suite et sans appel si la ligne est libre ou occupée, enfin surtout de ce que chaque dépêche est toujours et partout donnée par un courant de même force.

Indépendamment de l'organisation que nous venons d'exposer, M. Hipp a apporté une modification plus considérable au système télégraphique tel qu'il avait été établi en Suisse, par un changement important dans l'appareil même de Morse. Ce changement consiste à remplacer la force de l'électro-aimant développée au moyen des relais et de l'action d'une pile locale, par une puissance mécanique ordinaire, pour produire au moyen du style les signes conventionnels sur le papier. Pour obtenir cette substitution, il suffit de construire les deux dernières roues du mouvement d'horlogerie des appareils ordinaires, de façon qu'elles aient la même vitesse; elles portent sur leurs axes deux roues taillées en roue de rencontre ou à rochet, que le moindre mouvement de l'armature fait engrener quand elle est attirée par l'électro-aimant avec la partie supérieure d'un double râteau dont l'axe est le même que celui de l'armature; ce râteau, en marchant jusqu'à son extrémité, communique le mouvement de la roue supérieure au style qui presse alors sur la bande de papier. Dès que l'aimantation cesse, le mouvement de l'armature fait engrener le dessous du râteau dans la roue inférieure de l'appareil, ce qui remet le style dans sa position primitive. Comme ces mouvements ne durent qu'un instant très-court pour écrire chaque signe télégraphique, point ou trait, le râteau peut ne présenter qu'un petit nombre de dents soit pour conduire le levier, soit pour être ramené lui-même quand l'électro-aimant n'exerce plus d'attraction sur l'armature. La vitesse du mouvement dépend de celle des deux roues, qu'on peut rendre telle que l'exige une transmission à la fois prompte et fidèle de la dépêche. M. Hipp estime, à la suite d'une expérience de deux années d'application de ce système dans plusieurs des bureaux de la Suisse, qu'il présente, outre l'avantage de supprimer les relais et les piles locales, celui d'avoir pour l'impression

un mouvement parfaitement régulier indépendant de l'adresse de l'employé et dont la vitesse ne dépend que de la volonté du constructeur.

C'est sur le même principe que M. Hipp a construit son télégraphe militaire portatif qui n'aurait pas été possible sans la suppression de la pile locale et du relais. La pile consiste en couples charbon et zinc placés dans des cellules étroites et profondes remplies de sable humecté avec de l'acide sulfurique étendu; si le sable est humecté convenablement, il prend assez de consistance pour rester dans les cellules quand même celles-ci sont renversées. La solidité de tout l'ensemble de l'appareil a été mise à l'épreuve dans plusieurs occasions et en particulier quand il fut envoyé de Berne à Paris pour l'Exposition universelle avec les piles chargées; il fonctionna à son arrivée parfaitement bien, sans qu'il fût nécessaire de rien y toucher. La caisse qui renferme l'appareil et des piles assez puissantes pour permettre la correspondance sur une distance de cent lieues sans intermédiaire de translateurs, est d'une dimension qui lui permet d'être tout à fait portative, ayant une longueur intérieure de 28 cent. $\frac{1}{2}$ sur 15 de hauteur et 11 de largeur, et ne présentant qu'un poids total de 5 $\frac{1}{2}$ à 6 kilogrammes. Il va sans dire que ne sont pas compris dans ce poids les conducteurs en fil de cuivre recouvert de gutta-percha, destinés à établir la communication entre les stations.

On a imaginé plusieurs autres télégraphes enregistreurs qui sont des modifications plus ou moins heureuses de celui de Morse. L'un des plus ingénieux est celui de M. Froment, qui ne diffère de celui de Morse qu'en ce que l'électro-aimant agit sur une armature tournant autour d'un axe vertical, et que les signes tracés par le crayon et par le style présentent des traits horizontaux et parallèles à la direction du mouvement de l'armature. La dépêche se trouve écrite en signes au moyen d'un crayon qui se taille en écrivant, parce qu'il tourne sur lui-même en même temps qu'il exécute son mouvement de va-et-vient; le crayon est mû d'une manière directe et sans intermédiaire par l'armature de l'électro-aimant, qui peut exécuter jusqu'à trois ou quatre mille vibrations simples par minute. Aussi la

transmission des dépêches au moyen de ce télégraphe est très-prompte. Néanmoins on a continué à donner la préférence au système de Morse à cause de sa plus grande simplicité.

Il est toutefois une classe de télégraphes enregistreurs sur lesquels nous nous arrêterons quelques instants, soit parce qu'ils peuvent dans quelques cas remplacer avantageusement celui de Morse, soit parce qu'ils reposent sur un principe qui permet une reproduction de lignes beaucoup plus variée; ce sont les télégraphes *électro-chimiques*. Ils sont fondés sur la décomposition du cyanure de potassium, au moyen d'une pointe en acier ou en fer servant d'électrode positif, ce qui détermine la formation immédiate sur le papier imprégné de la solution de cyanure, d'un cyanure de fer (soit bleu de Prusse) dont la couleur, comme on le sait, est fort intense. Si maintenant on a à la station de départ un manipulateur dont la fonction soit d'établir et d'interrompre le courant de ligne à des intervalles plus ou moins longs, comme le levier-clef du télégraphe de Morse, on aura, à la station d'arrivée, sur la bande de papier imprégnée du cyanure de potassium et mobile, une trace bleue, toutes les fois que le circuit sera fermé, tandis que lorsqu'il sera ouvert, la pointe de fer ne laissera aucune trace sur le papier, lors même qu'elle continuera à être en contact avec lui.

M. Bain est le premier qui ait construit et employé avec succès le télégraphe électro-chimique. Son alphabet est le même que celui de Morse : un point et un trait, et leurs différentes combinaisons. Mais, au lieu de se servir du levier-clef, ou d'un appareil analogue pour transmettre la dépêche, M. Bain a trouvé plus commode de la *composer* d'avance. Dans ce but, au moyen d'un emporte-pièce d'une construction particulière, on découpe dans une longue bande de papier mobile, comme celle de l'appareil de Morse, des trous ronds et des traits qui ne sont que des trous allongés, en les combinant de façon à représenter la dépêche qu'on veut expédier, dont on a un *fac simile* complet. Pour la reproduire à la station d'arrivée, on fait passer à la station de départ, la bande de papier, convenablement percée, entre une roulette métallique et un ressort également métal-

lique qui presse la bande contre la roulette; en faisant tourner la roulette, on entraîne, par le seul effet du frottement, la bande dont toutes les parties viennent successivement passer entre le ressort et la roulette. Si le papier n'était point percé, le ressort et la roulette ne seraient jamais en contact; mais comme le papier est percé de trous, chaque fois que l'un de ces trous passe entre la roulette et le ressort, il y a contact entre ces deux pièces métalliques, et comme le mouvement de la roulette est uniforme, ce contact dure moins de temps lors du passage d'un trou rond que lors du passage d'un trou allongé. Le manipulateur ainsi constitué, il suffit que la roulette communique avec l'un des pôles de la pile[1] dont l'autre est en communication avec le sol, et que le fil de ligne aboutisse au ressort, pour que le courant soit transmis d'une station à l'autre, toutes les fois que la bande de papier, en passant, présente un trou, tandis que le courant est interrompu dès qu'il n'y a pas de trou, le papier ne conduisant pas l'électricité. On voit de même qu'à cause de la longueur plus ou moins grande des trous, les courants électriques circulent pendant des temps inégaux. On détermine ainsi, à la station de départ, des courants électriques interrompus, lancés à l'extrémité de la ligne, durant les uns un peu plus de temps, les autres un peu moins, et distribués dans un ordre déterminé suivant la nature de la dépêche[2]. A la station d'arrivée, le fil de ligne par lequel parvient le courant intermittent, aboutit à une pointe d'acier qui repose sur le papier imprégné de cyanure de potassium; ce papier se déplace d'un

[1] Il faut que ce soit le pôle positif.

[2] Le même système a été appliqué au télégraphe de Morse, pour transmettre la dépêche; ces papiers ainsi découpés d'avance, analogues aux cartons de Vaucanson et de Jacquart dans les métiers à tisser, remplacent, comme on le comprend, le levier-clef et font fonction de manipulateurs, en laissant passer et en interrompant le courant aux moments convenables. M. Siemens a construit un système d'emporte-pièce qui permet de découper très-rapidement des points et des lignes sur une bande de papier, c'est-à-dire d'écrire très-vite une dépêche; ce système consiste dans un appareil à trois touches, dans lequel la première touche fait les points, la seconde les lignes, et la troisième laisse les intervalles. Malgré ces perfectionnements, on préfère employer dans la pratique le levier-clef, quand il s'agit du télégraphe de Morse.

mouvement uniforme, comme dans le télégraphe de Morse, sous la pointe qui reste toujours en contact avec lui, en glissant le long d'un cylindre métallique qui est lui-même en contact avec le sol (fig. 391). Quand le courant électrique arrive, et ne dure qu'un instant, la décomposition chimique ne s'effectue que sur le point du papier qui est dans ce moment même en contact avec la pointe; elle cesse immédiatement après. Aussi, il n'apparaît sur le papier qu'un point bleu. Si, au contraire, le courant électrique a duré un certain temps pendant lequel le papier se soit déplacé sous la pointe, il en résulte un trait bleu, et ainsi de suite. De cette manière, on obtient à la station d'arrivée, un tirage exact de la composition exécutée à celle de départ.

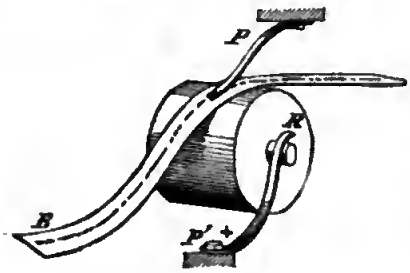


Fig. 391.

Dans le premier télégraphe électro-chimique de M. Bain, la feuille de papier imprégnée de la solution de cyanure avait la forme d'un grand disque et reposait sur un disque de métal auquel un mouvement d'horlogerie imprimait une rotation excentrique très-rapide, calculée de façon que la pointe de fer y traçât une spirale. L'alternative de points et de lignes se trouvait ainsi reproduite en bleu, en décrivant une hélice à tours serrés, partant du centre et allant jusqu'à la circonférence. Malgré l'excessive rapidité de la transmission de la dépêche qu'on obtient avec ce système, puisqu'on est parvenu à transmettre jusqu'à quinze cents lettres par minute, on a donné généralement la préférence à la combinaison dans laquelle une bande de papier se déroule sous la pointe positive de fer d'une manière analogue à ce qui a lieu dans le télégraphe de Morse. La dépêche est expédiée moins rapidement, il est vrai, mais elle est plus nette, et on ne risque pas, comme cela arrive quelquefois avec le système du mouvement en spirale, de passer des signes, ce qui exige qu'on recommence.

Nous devons ajouter encore que dans le télégraphe électro-chimique, on fait ordinairement usage, comme avec celui de

Morse, d'un relais et d'une pile locale dont le pôle positif doit communiquer avec la pointe d'acier, tandis que son pôle négatif aboutit au cylindre sur la surface duquel se déroule la bande de papier humectée (fig. 391). Le papier doit être préalablement trempé dans une dissolution préparée comme suit : *Eau* 100 parties; *azotate d'ammoniaque* 150; et *ferro-cyanure jaune de potassium* 5. La présence de l'azotate d'ammoniaque rend le papier assez hygroscopique pour être toujours dans l'état d'humidité qu'exige la manœuvre télégraphique.

Le télégraphe électro-chimique de M. Bain fonctionne, en Angleterre, sur une étendue de 300 kilomètres, de Londres à Manchester et de Manchester à Liverpool, il est vrai, concurremment avec d'autres. Il est également très-répandu en Amérique, où il sert à transmettre, avec une très-grande célérité, les débats du congrès et des cours d'assises dans des cas importants. Malgré ses avantages, qui consistent essentiellement dans une rapidité plus grande pour la transmission des dépêches et dans moins de chance d'interruption par l'imperfection de l'isolement, l'intensité du courant pouvant être plus faible, le télégraphe électro-chimique a dû cependant, pour l'usage habituel, céder le pas au télégraphe de Morse, dont la manipulation est plus simple et plus commode, vu qu'elle n'exige ni la transcription préalable de la dépêche, ni la préparation d'un papier particulier. Toutefois, le procédé électro-chimique a trouvé encore une application importante dans la construction d'un télégraphe particulier, dont l'idée, déjà mise en avant il y a quelques années par M. Bakewell, a été réalisée d'une manière différente et avec un succès remarquable par M. l'abbé Caselli de Florence. Nous allons chercher à en faire comprendre le principe, en nous aidant des documents que l'auteur a bien voulu mettre à notre disposition.

Les télégraphes enregistreurs dont nous avons parlé, sont ou des télégraphes imprimeurs ou des télégraphes qui transmettent les dépêches au moyen de signes conventionnels. Le nouveau télégraphe électro-chimique de M. Caselli, qu'il a nommé *pantographique*, reproduit sur du papier ordinaire, en caractères colorés, une image parfaitement exacte (*un fac simile*) de

l'écriture ou du dessin quelconque qu'on veut transmettre d'une station à l'autre, et cela quelles que soient la forme et la complication du dessin ou de l'écriture. Pour obtenir ce résultat, on commence par écrire la dépêche à la plume, avec de l'encre noire ordinaire, sur un papier dont la surface est recouverte d'une couche mince d'étain ou d'argent (papier argenté), puis on la place entre deux cylindres qui font partie de l'appareil *transmetteur;* aussitôt qu'on a fermé le circuit de la ligne télégraphique, la copie de l'original apparaît sur un papier chimique disposé entre deux autres cylindres qui se trouvent également au *récepteur*.

Il nous serait difficile de faire une description détaillée du système télégraphique imaginé par M. Caselli, et dont nous avons vu à Florence les premières épreuves avec des appareils qui n'ont pas encore entièrement la forme que l'auteur se propose de leur donner; nous nous bornerons donc à exposer sommairement les principes scientifiques sur lesquels repose cette belle invention, tout en faisant les réserves dues aux droits de propriété de l'auteur [1].

Il faut, avant tout, observer que le courant électrique qui circule, d'une station à l'autre, par un seul fil, est employé, dans ce système, à produire deux effets bien distincts : savoir à régler les mouvements mécaniques des appareils télégraphiques, et à faire naître, par une action électro-chimique, les caractères de la dépêche. La condition la plus importante à réaliser était d'obtenir un accord parfait entre les mouvements du transmetteur et ceux du récepteur. Ce but a été atteint d'une manière très-satisfaisante par une heureuse application de l'isochronisme des oscillations du pendule.

Supposons deux pendules égaux de la longueur d'un mètre, suspendus chacun par un axe horizontal et chargés chacun d'un poids de 20 kilogrammes, qui consiste dans un électro-aimant rectiligne [2]. Ces pendules, placés dans deux stations

[1] M. Caselli a du reste pris pour sa découverte des brevets d'invention dans les divers pays de l'Europe, notamment en France et en Angleterre.

[2] M. Caselli, en me montrant son appareil, me fit remarquer qu'il avait

correspondantes, constituent la partie essentielle des appareils, et sont reliés entre eux par le fil de ligne. Le courant conduit par ce fil doit traverser les verges de ces mêmes pendules pour achever son circuit. Maintenant si on dévie ces pendules de la verticale d'un certain angle, l'électro-aimant dont chacun d'eux est muni, reçoit une aimantation par l'effet d'une pile locale et demeure fixé contre une armure de fer forgé qu'il rencontre à l'extrémité de l'oscillation. Mais aussitôt que ces pendules sont parvenus à cette extrémité, le courant de ligne interrompt le circuit des piles locales, et les pendules, abandonnés simultanément à l'action de la pesanteur, marchent vers un second point d'arrêt situé de l'autre côté de la verticale, à la même distance que le premier; ils rencontrent également là une pièce de fer forgé qui, après avoir attiré l'électro-aimant fixé à leur extrémité, laisse passer le courant de ligne, dont l'effet est d'interrompre de nouveau l'action des piles locales et, par conséquent, de détruire l'aimantation, ce qui permet aux pendules de recommencer leur oscillation, et ainsi de suite. De cette manière, le synchronisme des mouvements des deux pendules est réglé par l'action du même courant électrique et est ainsi soustrait à l'effet de toute cause perturbatrice.

Le courant de ligne, après avoir réglé le mouvement des pendules à leur point de départ, reste libre pendant toute la durée de leur oscillation de manière à pouvoir être employé à la reproduction de la dépêche. La disposition de l'appareil permet à ce courant de circuler, pendant tout ce temps, d'une pointe de platine qui, dans le transmetteur, glisse en ligne directe sur la surface du papier métallique, recouverte, comme nous l'avons dit, de la dépêche écrite d'avance à la plume, à une pointe métallique (d'acier ou de fer) qui, par un mouve-

adopté pour les électro-aimants fixés aux extrémités des pendules, la forme imaginée par M. Cecchi, physicien distingué de Florence, et me fit ressortir les avantages que dans plusieurs cas cette forme présente comparativement à celle des électro-aimants en fer à cheval. L'électro-aimant de M. Cecchi consiste dans un cylindre de fer rectiligne terminé par deux masses cubiques de dimensions plus considérables que le cylindre autour duquel est enroulé le fil de cuivre recouvert de soie qui doit transmettre le courant.

ment semblable, glisse dans le récepteur le long de la surface du papier préparé chimiquement [1]. A chaque oscillation des pendules, on voit se répéter, d'une manière parfaitement identique, sur les deux appareils, le mouvement rectiligne des deux pointes métalliques, en même temps que les papiers se déroulent d'une fraction de millimètre par le mouvement des cylindres sur lesquels ils sont placés [2]. Comme l'encre avec laquelle la dépêche est écrite est un mauvais conducteur de l'électricité, il est facile de concevoir qu'il se produit une modification dans l'intensité du courant de ligne chaque fois que la pointe de platine du transmetteur rencontre un trait d'écriture, d'où résulte en même temps un changement dans l'action qu'opère continuellement sur le papier chimique la pointe du récepteur. Par l'effet d'une combinaison particulière qui constitue l'une des parties les plus nouvelles et les plus ingénieuses du système télégraphique de M. Caselli, l'altération dans l'intensité du courant produite par la résistance de l'encre au passage de l'électricité, plus grande que celle que présente la surface métallique du papier, détermine un renversement de polarité dans la pointe du récepteur. Elle devient positive de négative qu'elle était, ce qui produit sur le papier une coloration d'où résulte un ensemble de lignes et de points colorés qui reproduisent la parfaite image de la dépêche originale tracée à la plume. Le renversement instantané dans la direction du courant opère un effet chimique tellement rapide, qu'on peut ainsi reproduire immédiatement les traits les plus délicats de l'écriture et du dessin. Remarquons que, tant que la pointe du récepteur est négative, le courant, tout en passant, n'altère point la couleur du papier, de sorte que l'effet du passage de la pointe du transmetteur sur les traits tracés à l'encre n'est pas de déterminer le passage du courant sur le papier chimique,

[1] Il ne faut pas oublier que ce papier est roulé autour d'un cylindre métallique, qui permet de compléter le circuit, de sorte que le courant passe à travers le papier entre la pointe métallique et le cylindre.

[2] M. Caselli a réussi à faire marcher les pointes avec une telle rapidité que la transmission d'une dépêche, même d'une assez grande étendue, peut s'opérer en moins aussi vite que par les autres procédés télégraphiques les plus usuels.

Digitized by Google

puisque ce courant passait déjà, mais simplement de changer sa direction. Il serait à désirer que M. Caselli fît connaître la combinaison au moyen de laquelle il obtient ce résultat, et qu'il détachât cette partie de ses recherches de son grand travail sur le télégraphe qu'il a imaginé, d'autant plus que la méthode par laquelle il réussit à renverser si instantanément le sens d'un courant, de telle façon qu'il ne s'écoule pas de temps appréciable entre le passage du courant dans un sens et son passage en sens contraire, pourrait conduire, dans son application, à des résultats fort intéressants, particulièrement en ce qui concerne les rapports qui existent entre la constitution moléculaire des corps et les effets que produit sur eux la transmission de l'électricité.

d. *Télégraphes magnéto-électriques.*

Dans tous les télégraphes électriques dont nous avons parlé jusqu'ici, la source de l'électricité est une pile voltaïque composée d'un nombre plus ou moins grand de couples établis eux-mêmes suivant différents modes. En général, on emploie pour le courant de ligne des piles à sulfate de cuivre, et à eau légèrement acidulée, composées de couples plus ou moins nombreux suivant la résistance à vaincre, mais de dimensions peu considérables. Ces piles peuvent fonctionner pendant plusieurs mois, si l'on a soin de remettre de temps à autre des cristaux de sulfate de cuivre dans le vase même où plonge le cuivre du couple. On préfère, pour les piles locales dont le courant a une résistance beaucoup moindre à surmonter, des couples de Grove ou, plutôt, de Bunzen. Nous avons vu toutefois que Gauss et Weber avaient eu dès l'origine l'idée de se servir des courants d'induction pour les communications télégraphiques, et que Steinheil avait réalisé en grand cette idée. Plus tard, Wheatstone construisit un télégraphe à cadran dont le manipulateur consistait en une espèce de machine de Clarke, qui donnait pour chaque tour de la manivelle un nombre de courants induits correspondant avec les lettres du récepteur; les courants in-

duits étant instantanés, on conçoit qu'il n'y a pas besoin d'interrupteurs comme avec les courants continus des piles voltaïques. Il en résulte qu'une simple armature de fer doux entourée d'un fil de métal recouvert de soie, mobile devant un aimant fixe, sert à la fois de source d'électricité et de manipulateur. Les courants d'induction ont une tension suffisante pour vaincre la résistance des fils de ligne même les plus longs, ainsi que l'a démontré Wheatstone par une série de recherches faites avec beaucoup de soin. Un télégraphe de ce genre, établi par lui-même à la gare du chemin de fer de Rouen depuis dix ans, continue à fonctionner très-régulièrement; il a toutefois l'inconvénient d'être un peu lent à cause du grand nombre de révolutions que l'électro-aimant doit exécuter pour que l'aiguille du récepteur passe d'une lettre à une autre; ajoutons qu'il y a toujours au manipulateur un cadran divisé qui porte les lettres de l'alphabet comme celui du récepteur, et une aiguille dont la marche est parfaitement semblable également à celle du récepteur. M. Lippens a modifié le télégraphe magnéto-électrique à cadran de Wheatstone, en faisant usage d'une bobine fixe dans le manipulateur, et en rendant mobile seulement l'armature en fer doux intérieure qui est munie de parties plus proéminentes que les autres, qui s'aimantent en passant devant les pôles de forts aimants fixes. Il résulte de cette aimantation la production dans la bobine de courants induits qui agissent, par l'intermédiaire du fil de ligne, dans le récepteur.

Les courants induits, soit magnéto-électriques, ont été encore appliqués à la télégraphie électrique sous une forme différente de celle qui consiste à les employer simplement à faire marcher l'aiguille du télégraphe à cadran. Cette forme a été imaginée par Henley et appliquée par la Compagnie du télégraphe magnétique établie à Liverpool. Le courant est produit par des électro-aimants, soit armatures en fer doux entourées d'un fil conducteur, dont les pôles se meuvent dans une position très-rapprochée des pôles de forts aimants permanents représentés en A (fig. 392). Les électro-aimants sont mis en mouvement par des leviers qui sortent de chaque côté de la cage où est renfermé tout l'appareil, de sorte que la même personne

peut les faire marcher au moyen de ses deux mains. Un ressort les ramène à leur position primitive dès que la main cesse d'agir. A chaque pression exercée sur les leviers, il y a production d'un courant induit, et dès que la pression cesse, un autre courant également instantané, mais dirigé en sens con-

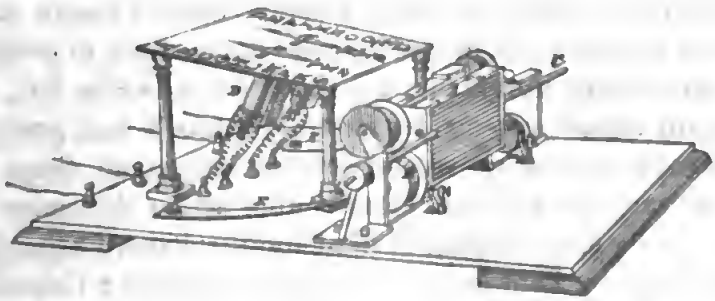


Fig. 392.

traire, est développé. Les courants ainsi produits sont transmis par les fils de ligne à la station où est le récepteur, et vont traverser les fils d'électro-aimants disposés, comme on le voit dans la figure 392, au-dessous de la tablette sur laquelle sont placées les aiguilles indicatrices. Les électro-aimants agissent chacun, au moment de leur aimantation, sur un petit aimant permanent suspendu au-dessous de la tablette, mais qui a le même axe que l'aiguille indicatrice à laquelle il est parallèle. Il en résulte une déviation de cette aiguille au moment où l'électro-aimant est aimanté par le courant induit, et cette déviation persiste par l'effet de l'attraction du fer doux de l'électro-aimant sur le petit aimant mobile, jusqu'à ce que le courant induit, dirigé en sens contraire du premier, vienne changer la polarité de l'électro-aimant et en même temps le sens de déviation de l'aiguille. On peut donc, à la station de départ, faire dévier chacune des aiguilles dans un sens ou dans l'autre en pressant sur les leviers ou en cessant de presser, et reproduire ainsi toutes les combinaisons du télégraphe à aiguilles de Wheatstone que nous avons décrit plus haut. La figure 392 représente un télégraphe magnéto-électrique à deux aiguilles, ce qui exige deux fils de ligne outre le retour par la terre. On peut n'avoir qu'une aiguille, ce qui permet de se contenter d'un

seul fil; mais dans ce cas on emploie avec avantage l'alphabet de Morse pour la transmission des dépêches. On grave sur le cadran ces signaux; une double oscillation correspond à un point, et un temps d'arrêt à une ligne. Pour produire la double oscillation ou le point, on presse sur une touche d'ivoire du manipulateur et on l'abandonne aussitôt; la pression sur la touche d'ivoire amène les électro-aimants, en leur faisant faire un quart de révolution, devant les pôles des aimants, et produit ainsi un courant instantané; l'abandon de la touche fait, au moyen du ressort, revenir les électro-aimants à leur position primitive, et produit un second courant instantané dirigé en sens contraire du premier. Cette double action détermine la double oscillation en faisant dévier l'aiguille d'abord à gauche, ensuite à droite. Pour faire faire un temps d'arrêt à l'aiguille, on tient abaissée quelques instants la touche du manipulateur; la déviation de l'aiguille du récepteur dure un moment, parce que le magnétisme développé dans l'électro-aimant par le courant induit ne cesse pas instantanément comme ce courant, et que d'ailleurs l'électro-aimant agit comme fer doux; mais, lorsque la touche se relève, le sens du magnétisme change, et l'aiguille revient à sa position primitive.

Remarquons qu'on peut obtenir les changements de position de l'électro-aimant du manipulateur par rapport à l'aimant fixe, non-seulement par un mouvement de rotation effectué autour d'un axe horizontal, comme dans la machine de Clarke, mais aussi en éloignant, à l'aide d'un levier, l'électro-aimant de l'aimant; c'est également en appuyant et en enlevant la main qu'on produit le double mouvement. Ce second moyen paraît dans la pratique plus simple et plus régulier; aussi a-t-il été adopté dans les télégraphes magnéto-électriques les plus perfectionnés.

On joint toujours au récepteur, dans les télégraphes magnéto-électriques comme dans les autres, une alarme ou sonnerie destinée à avertir qu'une dépêche va être transmise; on la fait même marcher en même temps que l'aiguille du récepteur, et le bruit qui en résulte coïncide avec les oscillations de cette aiguille. Au reste, les courants magnéto-électriques sont

très-commodes pour faire marcher les alarmes, vu que les appareils qui les produisent sont toujours prêts à entrer en fonction. Cet avantage existe moins, il est vrai, pour leur emploi en général dans la télégraphie; mais ils ont celui de rendre la construction du manipulateur beaucoup plus simple, puisqu'ils sont instantanés par eux-mêmes; enfin, il résulte de ce qu'ils sont alternativement en sens inverse qu'on évite, en s'en servant, la durée de l'aimantation du fer doux qui, quelquefois, ne cesse pas immédiatement avec le courant qui la détermine, mais surtout la production d'effets statiques dans les conducteurs sous-marins et souterrains, qui nuisent, comme nous le verrons dans l'instant, à la rapidité de la transmission des dépêches quand on se sert des courants ordinaires.

e. *Conducteurs employés dans les lignes télégraphiques.— Transmission simultanée de deux dépêches par un seul conducteur en sens contraires.*

Nous avons vu, en commençant ce paragraphe, qu'il y a dans tout système télégraphique trois choses à considérer : les appareils mêmes destinés à transmettre et à recevoir les signaux, les moyens de produire l'électricité nécessaire pour la transmission des signaux, et enfin le mode de communication ou les conducteurs qui permettent de faire passer un courant d'une station à l'autre. Nous nous sommes étendus suffisamment sur le premier point; nous nous sommes également occupés du second, en signalant les diverses sources électriques dont on fait généralement usage dans les stations télégraphiques. Quant au troisième point, nous ne l'avons traité qu'en partie et qu'en passant, et nous avons renvoyé à un article spécial les développements qu'il exige.

Nous avons déjà vu qu'il existe trois modes de communication électrique entre deux stations télégraphiques; savoir : les conducteurs aériens, c'est-à-dire les fils suspendus en l'air, les conducteurs souterrains ou sous-marins, et enfin le sol lui-

même ; nous allons examiner successivement ce qui concerne chacun de ces modes.

Les fils qu'on emploie généralement pour les lignes aériennes sont des fils de fer d'environ 4 millimètres de diamètre, recouverts d'une couche de zinc pour les rendre moins oxydables. Comme nous l'avons vu, ils sont supportés par des poteaux espacés convenablement, et sur lesquels sont fixés des supports isolants tantôt en porcelaine, comme en Angleterre et en France, tantôt en verre, comme en Allemagne et en Suisse ; ces derniers sont en verre de bouteille : ils surmontent le poteau et sont terminés par une espèce de champignon à bouton également en verre, autour duquel le fil de ligne est entortillé (fig. 393). On fixe quelquefois au même poteau plusieurs de ces supports en verre, quand il y a plusieurs fils télégraphiques à établir entre deux stations. La figure 394 re-

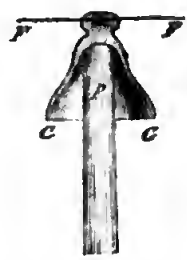


Fig. 393.

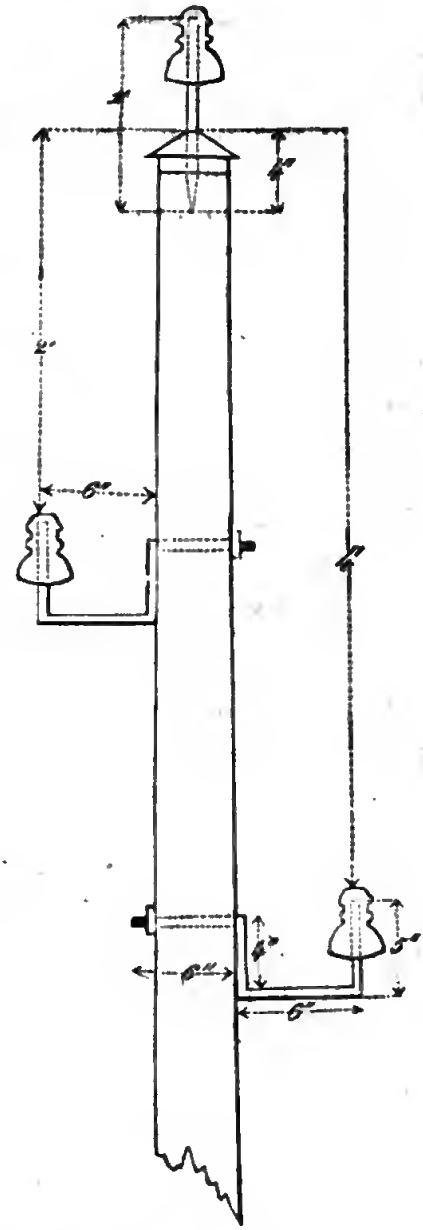


Fig. 394.

présente la disposition que l'expérience a indiquée, en Suisse, être la meilleure; on y trouvera même les dimensions en pieds et pouces des différentes parties de l'appareil et des distances qui les séparent [1]. En Angleterre, chaque poteau est recouvert d'un toit et porte à son extrémité supérieure une rainure dans laquelle se trouvent fixés de doubles cônes en faïence brune au travers desquels passent les fils de la ligne. Il existe aussi, ainsi que nous l'avons déjà dit, en Angleterre et en France, outre les poteaux souteneurs, des poteaux extenseurs qui ont des dimensions plus considérables que les autres, car ils doivent résister à la traction assez forte qu'on exerce sur les fils pour les tendre [2].

Un des inconvénients des lignes aériennes, c'est que les conducteurs y sont exposés aux effets de l'électricité atmosphérique qui, non-seulement, comme on l'a vu en maintes occasions, peut agir sur les appareils télégraphiques et donner lieu ainsi à des erreurs, mais qui risque aussi, ainsi que cela arrive quelquefois, d'occasionner des dégâts et même des accidents en pénétrant, au moyen des fils, jusque dans l'intérieur des stations. On a bien eu soin, dans les lignes anglaises [3], de surmonter les poteaux d'une pointe qui communique avec le sol par un fil conducteur; il est vrai que l'électricité atmosphérique, en s'écoulant par cette voie, ne risque plus de briser les poteaux; mais cette précaution ne l'empêche pas d'agir sur les fils eux-mêmes dans l'intervalle compris entre deux poteaux, et de trouver par leur moyen une voie facile pour pénétrer jusqu'au sol. Lorsque, d'après l'apparence du ciel, on reconnaît les symptômes d'un orage, on met, à l'aide d'un commutateur, le fil de ligne directement en communication avec la terre, ce qui permet à l'électricité atmosphérique de s'écouler dans le sol; mais lorsque l'appareil télégraphique est en fonction, cette électricité ne pouvant se décharger directement dans le globe terrestre, il est nécessaire d'avoir des moyens de se

[1] Des expériences comparatives faites en Suisse, entre les supports en verre et ceux en porcelaine, tels qu'on les fabrique en France avec beaucoup de soin, ont fait donner la préférence aux premiers.

[2] Voyez figure 379, p. 361.

[3] Figure 379, p. 361.

mettre à l'abri des accidents qui peuvent résulter de la transmission, souvent imprévue, d'une forte décharge électrique. M. Walker a imaginé, dans ce but, d'installer dans chaque station un parafoudre construit comme suit : Un cylindre creux C de cuivre (fig. 395), de 1 millimètre et demi d'épaisseur, est mis en communication avec le sol par un gros fil de cuivre E ; il est isolé du fil de ligne qui arrive en F, par un disque de buis D ; une bobine BB, également en buis, recouverte de trois ou quatre couches de fil de cuivre revêtu de soie, et plus fin que tous ceux qui entrent dans la formation de l'appareil télégraphique, est placée dans l'intérieur du cylindre dont elle remplit la capacité inférieure. Le fil de la bobine communique, par une de ses extrémités, avec la tige B, et, par l'autre, à un disque de cuivre F_1 situé au bas de l'appareil, isolé du cylindre de cuivre par un disque de buis ; enfin le fil de ligne communique avec F_1 au moyen de deux tiges de cuivre qui portent deux noix ou écrous M et N, munis, sur leur circonférence, de pointes rapprochées autant que possible des parois intérieures du cylindre ; des pointes partant du disque supérieur de cuivre s'approchent également du cylindre métallique C en communication avec le sol ; d'autres pointes partant de la base du même cylindre s'approchent du disque de cuivre placé en bas. Maintenant voici comment les choses se passent : le courant de ligne arrivant en F parvient, par la tige intérieure, au fil fin de la bobine qu'il traverse pour ressortir en E, aller de là aux appareils télégraphiques, sans risquer de se rendre dans le sol, le cylindre C, et par conséquent le fil E, étant isolés par les disques de buis supérieur et inférieur. Mais, si le fil de ligne est chargé d'électricité atmosphérique, cette électricité peut se décharger sur le cylindre C, et par conséquent sur le sol, au moyen des pointes supérieures et inférieures qui rapprochent ce cylindre des disques F et F_1 ; il y a plus, cette électricité peut encore s'échapper par les pointes dont sont munies les disques intérieurs M et N, et enfin, s'il en reste encore, elle brûlera le fil fin de la bobine de préférence au fil plus gros de l'électro-

Fig. 395.

aimant de l'alarme ou de l'appareil télégraphique. C'est ce qui arrive quand la décharge d'électricité atmosphérique est très-forte. M. Walker cite le cas d'un orage très-violent où la foudre entra dans deux stations, dont l'une, privée du parafoudre que nous venons de décrire, eut les fils de ses appareils entièrement détruits et les appareils eux-mêmes très-endommagés, tandis que l'autre conserva ses appareils intacts; seulement le fil du parafoudre dont elle était munie fut brûlé. Dans un autre orage, où la décharge d'électricité atmosphérique fut moins violente, cette décharge, après avoir pénétré jusque dans le fil de la bobine par les tiges intérieures, sauta au cylindre en brûlant le fil de soie et dénuda le fil métallique, mais sans le fondre.

Le parafoudre de M. Bréguet est construit d'après le même principe que celui de M. Walker, seulement le fil fin de la bobine est remplacé par un fil de fer très-fin qui unit deux boutons métalliques placés sur une planchette à une distance de 6 à 7 centimètres l'un de l'autre. Ce fil est renfermé dans un tube de verre pour être à l'abri de tout accident; il sert, comme on le comprend, à fermer le circuit de la ligne télégraphique, de telle façon que, s'il y a un excès d'électricité atmosphérique sur la ligne, le fil est fondu avant que les boutons soient atteints; les appareils sont ainsi préservés.

On a imaginé plusieurs autres appareils pour mettre à l'abri des effets de l'électricité atmosphérique les appareils télégraphiques. Dans le nombre, nous citerons le suivant qui est fondé sur la résistance que présente l'alcool au passage du courant électrique. Il consiste dans un conducteur en forme d'arc ou plutôt d'U renversé qui est placé dans l'intérieur d'un vase rempli d'alcool; au milieu et très-près des deux branches verticales de ce conducteur, et parallèlement à ces branches, s'élève une tige de métal dentelée, comme l'est aussi la lame elle-même qui est en forme d'arc; cette tige se termine en pointe vers la sommité de l'arc, mais sans la toucher, et est en communication avec le sol par son extrémité inférieure. Le courant de ligne est obligé, pour arriver au télégraphe, de traverser la lame en forme d'arc, qui est assez bien isolée au moyen de l'alcool pour que le courant ne soit point dévié; mais

dès que l'électricité atmosphérique s'y accumule, elle se transmet, au moyen des pointes, soit dentelures très-rapprochées, à la tige intérieure et de là au sol. On peut se passer d'alcool, et, dans ce cas, on donne à l'appareil une forme un peu différente; c'est une sphère de métal traversée par le fil télégraphique et maintenue au centre d'une autre sphère en verre, formée de deux hémisphères réunis par un large anneau en cuivre. Cet anneau est armé intérieurement de pointes peu distantes dirigées vers le centre de la sphère métallique jusqu'à une petite distance de la surface. Les deux hémisphères de verre sont terminés par des tubulures dans lesquels le fil conducteur passe en y étant mastiqué; l'appareil est disposé de manière que ce fil est horizontal et, par conséquent, l'anneau de cuivre vertical; la partie inférieure de cet anneau est munie d'un robinet métallique qui permet de faire le vide dans l'appareil, si on le juge nécessaire; le robinet porte un pas de vis qui doit recevoir la tige métallique, laquelle est destinée à mettre l'anneau métallique en communication directe avec le sol, tandis que le conducteur, qui conduit le courant du fil de la ligne et la sphère qui en fait partie restent complétement isolés. On conçoit qu'avec cet appareil l'électricité atmosphérique, qui se porte sur le fil de ligne et qui serait communiquée au télégraphe, est transmise au sol par l'intermédiaire de la sphère et des pointes dont est armé l'anneau. Un semblable appareil doit être, comme les précédents, placé à chaque station.

M. Hipp, ayant remarqué que le courant induit, dû à l'action de l'électricité atmosphérique, tend à sauter, suivant sa direction, d'une pointe à une plaque et jamais d'une plaque à une plaque ou d'une pointe à une pointe, a disposé les paratonnerres, sur les lignes suisses, de façon que la décharge trouve toujours moyen de sauter d'une plaque à une pointe, quelle que soit la direction dans laquelle elle chemine [1]. Dans ce but,

[1] Cette disposition est une modification de celle que Steinheil avait adoptée et qui consistait à interrompre le fil de ligne en fixant à chacune des extrémités séparées une rondelle en cuivre verticale, les deux rondelles étant appliquées l'une contre l'autre, mais avec l'interposition d'une couche isolante formée

on interpose dans le fil de ligne une plaque métallique traversée de deux pointes métalliques, au-dessous et très-près des quelles est une seconde plaque communiquant avec le sol et munie aussi de deux pointes également très-rapprochées de la première plaque (fig. 396).

Fig. 396.

Ces dernières formes de paratonnerres, dont l'idée primitive appartient à Steinheil, qui, le premier, songea à soustraire les appareils télégraphiques à l'action de l'électricité atmosphérique, reposent sur le principe que cette électricité, comme celle qui est développée par les machines électriques à frottement, tend à passer, sous forme d'étincelle par le plus court chemin, lors même qu'il y a un intervalle isolant, pourvu qu'il soit très-petit, tandis que le courant électrique qui provient d'une pile voltaïque exige pour sa transmission un circuit continu, et parcourra ce circuit, fût-il de plusieurs centaines de milles de longueur, plutôt que de suivre une route plus courte qui présenterait une légère interruption. Ce principe, qui est une conséquence de la différence de tension qui existe entre l'électricité produite suivant le premier mode et celle qui est produite suivant le second, se trouve confirmé par l'observation qu'avait faite Steinheil, avant d'avoir muni de parafoudres les stations télégraphiques, que lorsque le fil de ligne se trouve chargé d'électricité atmosphérique cette électricité éclate en étincelles d'un bout à l'autre du fil de l'appareil télégraphique, plutôt que de suivre tous les contours de ce fil, comme le fait le courant destiné à donner les signaux. Toutefois, il peut arriver qu'il n'en soit pas toujours ainsi, surtout quand l'action de l'électricité atmosphérique sur le fil de ligne est une action inductrice qui détermine dans ce fil un courant instantané, dont l'effet est de produire nécessairement une perturbation dans

d'une étoffe mince de soie, qui laisse passer la décharge due à l'électricité atmosphérique, mais non le courant électrique. Celui-ci arrive à l'appareil par un fil soudé à l'une des plaques, et retourne dans le sol par un second fil soudé à la seconde plaque, laquelle est fixée à la partie du fil de ligne qui est en communication avec la terre où se rend également la décharge.

les indications des appareils, mais sans néanmoins y occasionner de dégâts ou d'accidents fâcheux.

Outre les perturbations que peut produire l'électricité atmosphérique, les fils aériens présentent bien d'autres inconvénients tels que le défaut d'isolement quand les poteaux sont humides ou quand ils viennent à être en contact accidentellement avec quelque corps plus ou moins conducteur, tels encore que la facilité avec laquelle ils peuvent être rompus ou renversés soit par l'effet de la malveillance, soit par l'action du vent ou de toute autre cause accidentelle, tels enfin que les obstacles qui s'opposent à leur installation quand ils sont appelés à traverser des lieux habités et en particulier des villes ou de simples bourgades. Aussi, comme nous l'avons déjà dit, avait-on eu l'idée de substituer aux conducteurs aériens des conducteurs souterrains formés de fils recouverts d'une couche épaisse de gutta-percha; ce système, employé en Prusse, a dû être abandonné à cause des changements moléculaires qu'éprouve avec le temps la gutta-percha et qui, en permettant à l'humidité de s'y infiltrer, établissent une communication entre le fil métallique intérieur et le sol et font ainsi dériver le courant de la direction voulue. On avait bien imaginé des moyens ingénieux fondés sur la loi de Ohm pour découvrir les points de rupture ; mais la fréquence des accidents, jointe à la difficulté de les réparer, ont paru des inconvénients plus grands que ceux plus faciles à surmonter que présentent les lignes aériennes dont l'établissement est d'ailleurs beaucoup plus économique. Toutefois, dans les villes où la longueur des circuits n'est jamais bien considérable, l'emploi des conducteurs souterrains présente sous tant de rapports de si grands avantages qu'on les a généralement adoptés; seulement on préfère aux fils de cuivre recouverts de gutta-percha, de simples fils de fer qui sont déposés sur un lit de bitume et recouverts d'une autre couche de cette même substance; ces fils sont assez gros pour que la transmission du courant n'éprouve aucune résistance, et des expériences positives ont prouvé que leur isolement était suffisant. Cependant les fils recouverts de gutta-percha préparés avec soin peuvent servir au même usage, et on les emploie avec avantage

pour le passage des lignes télégraphiques à travers les tunnels, contre les parois desquels on les fixe sans craindre qu'il n'en résulte un défaut d'isolement.

Mais si l'on peut se passer de conducteurs souterrains quand il s'agit des lignes télégraphiques à établir sur la terre solide, il n'en est plus de même pour celles qui doivent lier entre eux des lieux séparés par la mer. Dans ce cas, il faut de toute nécessité que les fils conducteurs soient plongés dans la mer et qu'ils soient par conséquent enveloppés d'une couche bien isolante, car le plus petit point de contact entre le fil métallique et l'eau de la mer en faisant dériver le courant, interrompt la communication télégraphique. Il faut de plus que ces fils soient mis à l'abri non-seulement de l'action prolongée de l'eau de mer qui pourrait altérer la couche isolante, mais aussi des accidents auxquels pourraient donner lieu l'action des dents des poissons ou la rencontre d'objets durs et résistants. Wheatstone qui le premier, dès l'année 1840, avait eu l'idée qu'on pourrait établir des lignes télégraphiques à travers la mer, en avait combiné tous les moyens d'exécution, mais la première application n'en a été faite qu'en 1849, entre Douvres et Calais, par M. Jacob Brett. Depuis cette époque, plusieurs lignes sous-marines ont été installées ; il en existe déjà trois entre l'Angleterre et le continent, aboutissant l'une à Calais, l'autre à Ostende, l'autre à La Haye. Il en existe en outre une entre l'Angleterre et l'Irlande, d'autres dans les mers qui baignent le Danemark et la Suède, ainsi que dans le Bosphore; on en avait établi une longue de 640 kilomètres dans la mer Noire, entre Varna et Balaklava, pendant la guerre d'Orient. Enfin on est occupé à en poser deux autres dont la portée sera immense; l'une destinée à mettre l'Europe en communication avec l'Afrique, et par conséquent par l'Égypte avec les Indes et probablement l'Australie; l'autre, encore plus merveilleuse, reliera l'Irlande avec le banc de Terre-Neuve et la Nouvelle-Écosse, et permettra ainsi à l'Europe de communiquer télégraphiquement avec l'Amérique. Les sondages qu'exige cette dernière entreprise sont presque terminés, et tout fait espérer qu'avant une année elle sera achevée. Deux vaisseaux, chargés chacun de la moitié du conducteur,

iront à la rencontre l'un de l'autre, et les deux bouts seront soudés ensemble quand la rencontre aura eu lieu de manière à constituer un conducteur unique, ayant l'une de ses extrémités en Europe et l'autre en Amérique.

Ajoutons, avant de passer à la description des conducteurs eux-mêmes, que le tracé des lignes sous-marines est une opération aussi difficile que délicate; il faut, autant que possible, choisir une profondeur d'eau moyenne, car si la profondeur est trop grande on est obligé non-seulement d'augmenter la longueur du conducteur, mais de le soumettre à une pression énorme qui risque de l'altérer; si par contre la profondeur est trop faible le conducteur est exposé au choc des vaisseaux, des ancres, des glaces et des galets qui peuvent altérer son enveloppe.

Voici maintenant comment on s'y prend pour donner aux conducteurs ou *câbles sous-marins*, comme on les nomme, le degré d'isolement et de solidité convenables (fig. 397). Les fils conducteurs employés sont ordinairement des fils de cuivre rouge de 1 millimètre et de demi de diamètre environ : on peut en mettre plus d'un dans le même câble, on en a mis de un à cinq selon la multiplicité des correspondances à transmettre. Le fil ou chacun des fils, s'il y en a plus d'un, est recouvert d'un enduit ou fourreau en gutta-percha de 2 millimètres d'épaisseur, et mis en deux couches pour mieux assurer l'isolement; car si l'une des couches présentait une solution de continuité, il est probable qu'il ne se rencontrerait pas un défaut semblable dans le même point de la couche superposée. Quand il y a plusieurs fils, ils sont disposés les uns à la suite des autres comme les génératrices d'un cylindre et tangents par leur enveloppe de gutta-percha; on évite d'en mettre un au centre, sauf dans le cas où il n'y en a qu'un, car alors ce fil unique est forcément au centre. Le pourtour extérieur, ainsi que les fils eux-mêmes, sont garnis d'étoupe de chanvre goudronnée, matière qui contribue à l'isolement des fils et cède aux pressions sans influer sur la forme des fils conducteurs. Mais ce qui est essen-

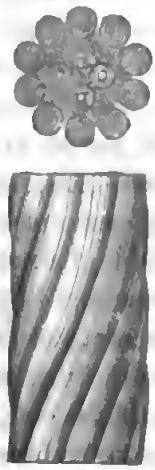


Fig. 397.

tiel, c'est l'enveloppe extérieure préservatrice qui est formée de gros fils de fer en nombre variable enroulés héliçoïdalement ; en sorte que le câble, malgré sa force, peut se plier suivant les exigences du fond de la mer, quand on l'y dépose. On recouvre, en général, cette enveloppe extérieure de fer d'une couche de zinc très-mince pour la protéger contre l'oxydation. Du reste il paraît que l'action chimique de l'eau de mer sur les fils protecteurs est à peu près nulle, qu'ils soient ou non recouverts de zinc, ce qui tient à une couche de sable et de coquillages qui ne tarde pas à s'y déposer.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur tous les procédés ingénieux mis en pratique pour la construction des câbles sous-marins en particulier dans les ateliers de M. Newall à Gateshead, près de Newcastle, ni sur les moyens employés et les précautions nécessaires pour les transporter et les plonger dans la mer. Nous nous bornerons à remarquer que malheureusement les câbles sous-marins ne sont pas à l'abri de toute chance d'accident ; la plupart de ces accidents sont dus aux ancres des navires ; plusieurs câbles ont été coupés par ces ancres. Pour obvier à cet inconvénient, les navigateurs sont invités, par des avis publiés dans les journaux, à ne pas jeter l'ancre dans le voisinage des câbles télégraphiques dont on leur indique les positions exactes, qu'ils doivent tracer eux-mêmes sur leurs cartes. Outre cette cause d'accident, il ne faut pas se dissimuler que les câbles le plus souvent ne sont pas à une profondeur assez grande pour être à l'abri des violentes agitations de la surface de la mer, et qu'ils reposent quelquefois sur de nombreuses crêtes, de sorte que dans les grandes tempêtes ils risquent de se limer et de se rompre sur ces crêtes [1].

Pour terminer ce sujet, nous dirons que le câble placé entre Douvres et Calais (fig. 398) renferme quatre fils de cuivre et a une enveloppe extérieure composée de dix gros fils de fer ; il a

[1] Cette prévision, signalée pour la première fois par M. Pouillet, a été malheureusement réalisée en janvier 1857 ; tous les câbles sous-marins, qui lient l'Angleterre au continent, ont été rompus par l'effet des grandes tempêtes qui ont eu lieu à cette époque, mais ils ont été réparés en peu de temps.

30 kilomètres de longueur et pèse six tonnes par kilomètre, soit 180,000 kilogrammes en tout. Celui d'Irlande (fig. 399) a 138 kilomètres de longueur et ne pèse que 610 kilogr. par kilomètre, soit en tout 80,000 kilogr.; il n'a qu'un fil de cuivre intérieur, et son enveloppe extérieure est composée de 12 fils de fer, mais beaucoup plus minces que ceux du câble de Douvres. On conçoit l'avantage qu'il y a à ce que le câble renferme

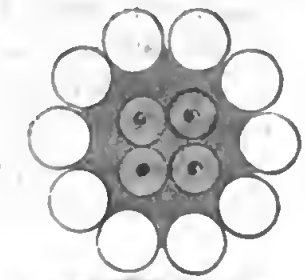


Fig. 398.

Fig. 399.

un grand nombre de fils de cuivre isolés les uns des autres, à cause de la facilité qui en résulte pour multiplier le nombre

des dépêches en permettant autant de communications simultanées et indépendantes qu'il y a de fils.

L'emploi des conducteurs sous-marins, aussi bien que celui des conducteurs souterrains, occasionne un petit retard dans la vitesse de transmission de l'électricité; ce retard n'est point dû à la longueur du trajet que doit parcourir le courant électrique, puisqu'il n'a pas lieu avec un conducteur aussi long, mais isolé dans l'air. Nous avons vu[1] qu'il provient, ainsi que Faraday l'a démontré, d'une réaction statique que détermine l'introduction d'un courant dans un conducteur bien isolé, mais entouré au delà de sa couche isolante d'un corps conducteur, tel que l'eau de mer, ou le terrain humide, ou même simplement l'enveloppe métallique des fils de fer, mise en communication avec le sol. Ce conducteur, quand on le fait aboutir à l'un des pôles d'une pile dont l'autre pôle communique avec le sol, se charge d'électricité statique, comme l'armure d'une bouteille de Leyde; électricité qui est capable de donner naissance à un courant de décharge, même après que le courant voltaïque a cessé d'être transmis. Nous ne reviendrons pas sur les expériences de Faraday, que nous avons déjà exposées; nous nous contenterons de rappeler celles par lesquelles Wheatstone a complété l'étude de ce sujet aussi intéressant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique.

Le câble avec lequel M. Wheatstone a fait ses expériences est celui qui était destiné à unir la Spezzia sur les côtes du Piémont avec l'île de Corse. Il était long de 177 kilomètres et contenait six fils de cuivre de $1\frac{1}{2}$ millimètre de diamètre, isolés individuellement et recouverts chacun d'une couche de gutta-percha de 2 millimètres d'épaisseur. L'ensemble du câble était entouré de 12 fils de fer épais contournés en spirale, de manière à former une enveloppe métallique de 8 millimètres d'épaisseur. Le câble était enroulé dans un puits desséché de la cour, avec ses deux extrémités accessibles; les bouts des différents fils pouvaient être unis de manière à ne faire de tous ces fils qu'un fil unique long de 1062 kilomètres (266 lieues), à travers lequel

[1] Tome II, pages 134 et suivantes.

le courant électrique pouvait circuler dans la même direction; ce courant lui-même était fourni par une pile isolée formée de 144 couples de Wheatstone[1].

Dans une première série d'expériences on a constaté que, si l'on faisait communiquer l'une des extrémités du long fil dont l'autre extrémité restait isolée, avec l'un des pôles de la pile, ce fil se chargeait de l'électricité de ce pôle; charge qui, tant qu'elle avait lieu, donnait naissance à un courant qu'accusait un galvanomètre; mais il fallait pour obtenir ce résultat que le second pôle de la pile fût en communication avec le sol; si ce pôle restait isolé, on n'obtenait aucun effet. On pouvait cependant remplacer le sol par un long fil semblable au premier. C'est ce que Wheatstone a fait voir, en prenant sur le câble deux longueurs de fil de cuivre de 177 kilomètres chacune; laissant isolée une des extrémités de chacun de ces circuits partiels, il faisait communiquer leurs deux autres extrémités avec les deux pôles de la pile respectivement, ayant soin d'interposer entre chacun des fils et les pôles un galvanomètre; de cette manière chaque pôle de la pile était armé d'un conducteur de 177 kilomètres, isolé à celle de ses extrémités qui n'était pas en communication avec la pile, laquelle était elle-même isolée, comme nous l'avons dit. Aussi longtemps qu'un seul des pôles de la pile était armé de son long conducteur, ce conducteur ne se chargeait pas d'électricité; mais aussitôt que les deux pôles étaient également armés de leurs conducteurs, les deux conducteurs se chargeaient instantanément d'électricité, et la forte déviation des aiguilles indiquait la présence d'un courant intense. Si l'on faisait communiquer l'extrémité libre de l'un des fils avec la terre, ce fil était déchargé seul; l'autre restait totalement chargé.

Dans une seconde série d'expériences, M. Wheatstone a répété et varié les expériences de Faraday, en interposant trois galvanomètres au milieu et aux extrémités du circuit, et en déterminant de cette manière, par l'ordre qu'ils suivaient dans leur déviation, la marche du courant. Ainsi, suivant que c'était

[1] Tome II, page 715, figure 326.

avec le pôle de la pile ou avec le sol qu'on faisait d'abord communiquer l'un des deux bouts du galvanomètre, l'autre bout étant mis en communication avec le sol ou avec le pôle de la pile, un instant après, on voyait les galvanomètres être déviés dans l'ordre de leur distance à la pile ou dans l'ordre inverse. Si on réunissait les deux pôles de la pile par le long conducteur de 1062 kilomètres, mais en ayant soin de le partager en deux portions égales en longueur, on observait, en réunissant les deux extrémités libres de ces deux portions pour fermer le circuit, que le galvanomètre placé au milieu était le premier dévié, tandis que les galvanomètres voisins des pôles n'étaient déviés que plus tard. C'était l'inverse, si après avoir uni les deux extrémités libres du milieu et avoir mis en contact l'un des bouts du long conducteur avec l'un des pôles de la pile, on finissait par amener l'autre bout en contact avec le second pôle. Tous ces effets sont d'accord avec ce que nous avons déjà vu et dit à l'occasion des expériences de Faraday.

Une troisième série d'expériences a montré à Wheatstone qu'on peut avoir un courant continu, en plaçant un galvanomètre dans le circuit du long fil d'un câble électrique dont l'un des bouts est isolé, tandis que l'autre communique avec l'un des pôles d'une pile dont le second pôle aboutit au sol. Ce courant est dû à la dispersion uniforme et continuelle d'électricité statique dont le fil est chargé sur toute sa longueur, comme cela arriverait à un autre corps conducteur quelconque placé dans un milieu isolant. En plaçant le galvanomètre tout près du pôle de la pile, on peut constater que l'intensité du courant ainsi produit est approximativement proportionnelle à la longueur du fil qu'on ajoute au delà du galvanomètre. On a, en effet, pour 0 kilomètre de fil ajouté 0° de déviation, pour 177 kilomètres 6°$\frac{1}{2}$ de déviation, pour 354 kilomètres 12°, pour 531 kilomètres 18°, pour 708 kilomètres 23°$\frac{1}{2}$, pour 885 kilom. 28°, pour 1062 kilomètres 31°. Si l'on change de place le galvanomètre, le courant est d'autant plus faible qu'on l'interpose à une plus grande distance du pôle de la pile; s'il est à l'extrémité même du long fil, le courant devient nul. Enfin l'intensité du courant ne dépend que de la longueur du fil qui est placé au

delà du galvanomètre, la longueur de celui qui se trouve interposé entre le galvanomètre et la pile n'exerçant aucune influence. Ainsi 354 kilomètres de fil placés au delà du galvanomètre déterminent une déviation de 12°, aussi bien si le galvanomètre est directement en communication avec le pôle de la pile que lorsqu'il en est séparé par un fil de 708 kilomètres. Ce résultat nous prouve que, quelle que soit la longueur du fil attaché au pôle isolé d'une pile, ce fil est chargé d'électricité au même degré de tension sur sa longueur entière.

Le retard qu'éprouve la transmission de l'électricité par les câbles sous-marins, et que nous venons d'analyser soit dans ses manifestations, soit dans sa cause, n'est pas d'une grande importance pour les communications télégraphiques ordinaires. Il l'est davantage quand il s'agit de la détermination des longitudes, comme nous le verrons à la fin de ce chapitre; il rend également très-difficile, sinon impossible, la transmission simultanée de deux dépêches en sens contraire qu'on a tentée avec succès, comme nous allons le dire dans l'instant, avec les fils télégraphiques aériens.

Remarquons en passant que les expériences qui précèdent confirment complétement les théories que nous avons exposées dans notre second volume sur la manière dont s'opère dans les corps conducteurs la propagation de l'électricité, et sur le mode de dégagement de l'électricité dans un couple voltaïque, qui exige pour la décomposition chimique nécessaire à la manifestation de cette électricité, que les deux électricités contraires trouvent également une issue. Il est en effet impossible de charger un conducteur quelconque en le mettant en communication avec l'un des pôles d'une pile, sans que l'autre pôle communique également avec un grand conducteur ou avec le sol.

Nous sommes amenés tout naturellement ici à dire quelques mots sur le rôle que joue la terre quand on l'emploie comme conducteur dans les opérations relatives à la télégraphie électrique. Nous avons déjà vu que l'idée d'employer la terre comme conducteur entre deux stations télégraphiques, réalisée pour la première fois par Steinheil, avait permis de supprimer l'un des fils conducteurs et de réaliser ainsi une grande économie et

une grande simplification dans la pratique. On avait d'abord cru que le sol jouait le même rôle que le conducteur qu'il était destiné à remplacer, et qu'il s'établissait entre les deux pôles de la pile mis en communication avec la terre, lors même qu'ils étaient à une grande distance l'un de l'autre, un véritable courant électrique transmis à travers toutes les matières conductrices interposées et que renferme toujours la terre en plus ou moins grande proportion. Il est vrai que le globe terrestre ne peut pas être considéré comme étant de sa nature un conducteur aussi parfait qu'un métal, mais d'un autre côté sa mauvaise conductibilité se trouve plus que compensée par l'immensité de sa section. On peut donc considérer la terre comme présentant une résistance nulle à la conductibilité[1]; seulement, il faut admettre que des courants électriques peuvent s'y croiser en tous sens et à tout instant sans se nuire les uns aux autres. Il y a plus, il faut supposer qu'entre deux stations extrêmement éloignées, telles que Paris et Berlin, il y a une série de décompositions et

[1] Une expérience importante de M. Breguet montre en effet que cette résistance est nulle. Une pile étant à Paris, l'un de ses pôles communiquait avec la terre au moyen d'un fil terminé par une large plaque plongée dans un puits; l'autre pôle communiquait avec le fil de la ligne, et l'extrémité de celui-ci, à Rennes, plongeait de même dans un puits; ainsi, dans ce cas, le circuit était formé moitié par la terre et moitié par le fil. On se procurait aussi à volonté un circuit tout métallique avec les fils de cuivre, dont chaque extrémité, à Paris, était unie à l'un des pôles de la pile, pendant qu'à Rennes les deux autres extrémités étaient unies ensemble. Des opérations semblables étaient faites à Rennes, où se trouvait également une pile. Au moyen de deux galvanomètres à sinus, M. Breguet mesurait l'intensité du courant à Paris et à Rennes, quand un courant traversait le fil de cuivre et la terre, ou les deux fils de cuivre réunis. Il a trouvé ainsi que l'intensité du courant dans le premier cas, c'est-à-dire quand la moitié du conducteur est remplacée par la terre, est double de ce qu'elle est quand le courant revient par un second fil semblable au premier. M. Matteucci était parvenu de son côté aux mêmes résultats. Il avait trouvé que lorsque le courant allait par le fil de cuivre de Pise à Pontedera, et revenait de Pontedera à Pise par terre, son intensité était la même que lorsque les deux pôles de la pile étaient immédiatement réunis par un seul fil de cuivre, long comme celui qui unit les deux stations. — Ces expériences, et un grand nombre d'autres semblables, permettent donc d'admettre que la résistance de la terre à la conductibilité électrique est nulle.

recompositions de toutes les molécules d'eau interposées, et que l'électricité positive, par exemple, qui est introduite dans le sol à Paris, ne pourra être neutralisée que par la négative provenant de la même pile, mais amenée par le fil télégraphique dans le sol, à Berlin; neutralisation s'opérant de molécules à molécules à travers toutes les sections conductrices qui se trouvent dans le globe terrestre entre ces deux stations. Il faut également admettre que, lorsque les pôles positifs et négatifs de plusieurs piles plongent en même temps dans le sol, à de grandes distances les uns des autres, l'électricité positive de chaque pôle va chercher, pour la neutraliser, la négative du pôle appartenant à la même pile, lors même que ce pôle serait beaucoup plus distant que le négatif d'une autre pile. Cette espèce de prédisposition des deux électricités à ne se neutraliser que lorsqu'elles proviennent de la même source, nous paraît une hypothèse également contraire à la logique et aux observations.

Il faut donc recourir à une autre explication sur le rôle que joue la terre dans les phénomènes de la conductibilité électrique, explication qui découle tout naturellement des faits observés avec les câbles électriques par Faraday et Wheatstone. Ce rôle est celui d'un vaste réservoir, d'une espèce de puisard qui suce et absorbe aux deux extrémités du fil les électricités libres que la pile ou l'appareil quelconque générateur de l'électricité y envoie. Par cela même que cette électricité se perd ou s'écoule, il y a un mouvement électrique, et par conséquent production d'un courant. Déjà M. Magrini, dans des expériences faites avec de longs fils télégraphiques bien isolés, tendus de Milan à Monza, avait montré qu'on pouvait obtenir un courant électrique dans un fil dont une des extrémités seulement communiquait avec une source d'électricité, tandis que l'autre restait isolé. Mais on pouvait craindre, dans ce mode d'opérer, quelque défaut d'isolement. Cette crainte disparaît complétement dans les expériences de Faraday et de Wheatstone; ces dernières en particulier nous montrent très-clairement qu'il suffit de faire communiquer avec l'un des pôles d'une pile, l'extrémité d'un conducteur d'une très-grande dimension dont

l'autre extrémité est isolée, pour que ce conducteur en se chargeant, soit traversé par un courant dont la présence est accusée par la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre. Le même phénomène se passe avec la terre, avec cette différence que le globe terrestre étant un conducteur d'une dimension infinie, le courant peut durer tant que la communication du pôle avec le sol a lieu.

M. Matteucci, qui s'est beaucoup occupé de la conductibilité de la terre, avait fait la remarque curieuse que lorsqu'on plonge les électrodes dans le sol à une profondeur convenable, la résistance de la couche interposée augmente exactement avec sa longueur, suivant la loi admise pour les conducteurs ordinaires; il n'y a pas même de différence, lorsque la couche est très-mince, entre sa résistance et celle de la même couche de terre ou d'eau contenue dans un vase isolé. Mais si la distance entre les électrodes devient considérable, la résistance de la couche terrestre diminue très-rapidement; déjà, à la distance de 60 à 100 mètres, le courant cesse de diminuer; à des distances plus grandes, son intensité augmente jusqu'à devenir égale à celle qu'on trouverait avec le circuit entièrement métallique. Ce résultat se vérifie toujours pour des distances de 15 à 20 kilomètres. L'augmentation du courant avec la longueur de la couche terrestre est indépendante de la nature et de la forme de cette couche; c'est avant d'être parvenu à la longueur de la couche à laquelle cesse la résistance, qu'on observe l'influence de la nature et de la forme de cette couche sur cette même résistance. Cette observation de M. Matteucci nous montre clairement que la terre peut jouer deux rôles très-différents dans la transmission des courants. Elle peut faire office de conducteur ordinaire quand les électrodes sont très-rapprochés, et alors la résistance qu'elle oppose au courant augmente avec la longueur de la couche terrestre interposée; mais il arrive que, lorsque la distance entre les électrodes atteint une certaine grandeur limitée, la terre agit comme réservoir qui absorbe les électricités dégagées à chacun des pôles; alors sa résistance disparaît, et l'intensité du courant ne dépend plus que de la résistance du seul fil conducteur; de sorte que

l'intervention du globe terrestre présente le double avantage de permettre l'économie d'un fil de ligne, et de rendre le courant deux fois plus fort qu'il ne l'aurait été si on l'avait fait revenir par le second fil supprimé[1].

Au reste, bien d'autres faits d'un genre différent démontrent qu'il n'est pas nécessaire, pour obtenir un courant, de réunir les deux électricités contraires produites par le même appareil électrique, mais qu'il suffit que l'une des deux électricités soit absorbée. C'est ainsi que, lorsqu'on met en communication avec le sol l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde, on peut obtenir dans l'air une décharge semblable à un courant en munissant d'une pointe son armure intérieure ; or, on ne songe pas à dire que les deux électricités transmises, l'une dans la terre, l'autre dans l'air, se réunissent par le contact du sol et de l'air. Il y a plus; nous avons démontré, M. Soret et moi, qu'on peut décomposer l'eau en la faisant traverser par l'électricité qui abandonne l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde qu'on charge par son armure intérieure; or, il est bien évident que dans ce cas le courant qui produit cette décomposition, ne provient pas de la réunion des deux électricités contraires dégagées par la machine électrique qui charge la bouteille.

Le rôle que joue la terre dans la transmission des dépêches télégraphiques est donc d'accord avec un très-grand nombre de phénomènes du même genre, qui nous ont démontré que la propagation de l'électricité, et par conséquent la production d'un courant électrique, peut avoir lieu dans un corps conducteur aussi bien quand ce corps est mis en communication avec

[1] Cette différence entre ce qui se passe quand les électrodes sont rapprochés et ce qui a lieu quand ils sont éloignés peut sembler extraordinaire au premier instant; cependant, en y réfléchissant, on conçoit facilement que dans le premier cas les molécules interposées entre les deux electrodes, n'étant pas aussi nombreuses, elles peuvent constituer la chaîne électrique par l'effet de la neutralisation mutuelle de leurs électricités opposées, qui est précédée de leur polarisation. Quand les électrodes sont très-distants, il ne peut plus y avoir cette communication entre eux, et alors ils se déchargent au moyen de la couche avec laquelle ils sont en contact, dans toute la masse du globe terrestre.

un autre chargé d'un excès de l'une des deux électricités seulement, que quand il se trouve placé entre deux excès d'électricités contraires.

Ajoutons que, quand on se sert du globe terrestre pour déterminer la circulation d'un courant dans un conducteur isolé dont une des extrémités communique avec l'un des pôles d'une pile et l'autre avec le sol, pendant que le second pôle de la pile communique aussi avec le sol, il faut avoir soin de bien établir ces communications. Dans ce but on termine les fils conducteurs qui aboutissent à la terre par de larges plaques métalliques, de cuivre ordinairement, qu'on plonge aussi profondément qu'on le peut, dans des puits ou dans la partie du sol la plus humide qu'on puisse trouver.

La question que nous venons de traiter sur le rôle que joue le globe terrestre dans la transmission des courants électriques, est liée avec celle que nous avons déjà traitée incidemment, de savoir si le même conducteur peut transmettre en même temps deux courants électriques dans deux directions opposées[1]; nous l'avons résolue négativement quand il s'agit d'un conducteur à dimensions finies et dont toutes les molécules, interposées entre les deux électricités contraires, doivent être successivement polarisées et déchargées de manière à constituer le courant. Il nous a été impossible d'admettre que les mêmes molécules pussent être polarisées et déchargées en même temps dans des directions opposées; nous avons vu que du reste les phénomènes qui semblaient démontrer cette transmission simultanée de deux courants contraires s'expliquaient tout aussi bien en admettant qu'il n'y avait pas de transmission effective. Mais il n'en est plus de même quand le conducteur a des dimensions infinies relativement à la quantité d'électricité qui est mise en jeu; ce conducteur, agissant alors comme absorbant, peut évidemment transmettre, ou plutôt avoir l'apparence de transmettre, dans tous les sens également, et par conséquent simultanément dans le même sens, des courants électriques ayant des directions opposées, comme cela a effecti-

[1] Tome II, page 837.

vement lieu avec le globe terrestre. Par contre, avec un fil comme un fil télégraphique, il n'en est pas de même. Cependant on a découvert récemment divers moyens pour transmettre simultanément deux dépêches par un même fil dans deux directions opposées; mais, comme nous allons le voir en décrivant le procédé employé, il n'en résulte pas que deux courants circulent en même temps dans le fil en sens contraire; ce n'est qu'une apparence due à une combinaison dont l'effet véritable est de permettre en même temps à chaque station la manifestation, par les appareils dont cette station est munie, des signes convenables, au moyen de piles locales.

MM. Gintl, Wartmann, Siemens, Halske et Edlung se sont occupés également à résoudre le problème de la transmission de deux dépêches par un même fil dans deux directions opposées; ils sont arrivés presque en même temps à sa solution par des procédés qui, tout en différant dans les détails, ont une grande analogie au fond. Les uns ont appliqué leur procédé au télégraphe électro-chimique, les autres à celui de Morse, ce qui importe peu; car, une fois la question résolue, il est évident qu'elle l'est pour tout système télégraphique quelconque. Aussi il ne s'agira pour nous que de savoir comment on peut faire marcher convenablement en même temps deux relais, situés à deux stations différentes, qui doivent transmettre et recevoir simultanément chacun une dépêche; une fois les relais exécutant chacun les mouvements convenables pour accuser la dépêche reçue, le reste suit de soi-même.

Pour obtenir ce résultat, on enroule en sens contraires l'un de l'autre, autour de l'électro-aimant de chaque relais, deux fils de métal recouverts de soie parfaitement semblables, disposition qui fait que, lorsque deux courants égaux et de même sens les traversent parallèlement, il n'y a point d'aimantation et par conséquent aucun mouvement dans le relais. Ces deux fils sont soudés ensemble par une de leurs extrémités; ce point de soudure ou de contact est en communication avec une pièce métallique que nous appellerons A; des deux autres extrémités libres, l'une B communique avec le fil de ligne, l'autre C peut à volonté communiquer avec le sol ou avec un conduc-

teur D par l'intermédiaire du fil d'un rhéostat, auquel on donne chaque jour la longueur nécessaire pour que sa résistance soit égale à celle du fil de ligne. Le conducteur D aboutit au sol et peut être mis en communication avec l'un des pôles d'une pile locale P. Il résulte de cette disposition que si l'on fait communiquer l'un des pôles de cette pile locale, le pôle positif, par exemple, avec le point de soudure A, au moment où l'on fait communiquer l'autre pôle avec le conducteur D, le courant s'établit en se bifurquant au point A en deux parties, dont l'une, suivant le fil de ligne, revient par le sol à la station de départ, et dont l'autre, sortant en C, retourne au pôle négatif par l'intermédiaire du fil du rhéostat du conducteur D. Ces deux portions de courant n'agissent pas sur le relais de la station de départ, puisqu'elles sont reduces égales, comme nous l'avons vu. Tout est disposé exactement de la même manière à la seconde station; c'est aussi le pôle positif d'une pile P′ qui aboutit au point de soudure A′ des deux fils enroulés en sens contraires autour de l'électro-aimant du relais de cette station. Quand le pôle négatif de la pile P′ est mis en communication avec le sol, au moyen du conducteur D′, le courant de cette pile se partage aussi en deux parties, dont l'une sort par l'extrémité B′ de l'un des fils pour parcourir le fil de ligne et revenir par le sol au point de départ, et l'autre sort par l'extrémité C′ du second fil pour revenir au pôle négatif par l'intermédiaire du fil d'un second rhéostat placé également à cette station, et du conducteur D′. Les communications avec le sol des pôles négatifs des piles de chacune des stations peuvent être établies ou interrompues à volonté par celui qui transmet la dépêche, au moyen d'un levier-clef; c'est en agissant sur ce levier-clef, comme on le fait dans le télégraphe de Morse, qu'on transmet les signaux, et à chaque station on peut agir sur le levier-clef d'une manière indépendante sans s'inquiéter si on agit à la station correspondante. Voyons maintenant comment les choses se passent.

On agit à la première station sans agir à la seconde, par conséquent sans que la communication avec le conducteur D′ du pôle négatif de la pile P′ existe à cette station, ou que le rhéostat

soit dans le circuit. Le courant, parti de la première, traverse le relais qui s'y trouve sans agir sur lui, comme nous l'avons vu; une de ses moitiés parcourt le fil de ligne, entre en B′ dans le fil de l'électro-aimant du relais de la seconde station, arrive au point de soudure A′ des deux fils, entre dans le second et ressort en C′, pour de là pénétrer dans le sol et revenir au pôle négatif de la pile de la première station. Il est facile de voir que ce courant, qui n'a pas agi sur le relais de la première station, doit agir sur celui de la seconde, puisque, par l'effet de la disposition des deux fils, il les parcourt *successivement* dans le même sens; tandis que, lorsque le courant les parcourt *parallèlement* en se bifurquant entre eux, ses deux portions les traversent en sens contraire [1]. Les choses se passent de même quand, pour expédier une dépêche de la seconde station à la première, on fait communiquer à la seconde station le pôle négatif de la pile avec le conducteur D′ et par conséquent avec le sol, et en même temps avec l'extrémité C′ du second fil du relais par l'intermédiaire du rhéostat. Le courant se bifurque entre les deux fils du relais, n'agit donc pas sur lui; une moitié achève son circuit à travers le fil du rhéostat, l'autre moitié parcourt le fil de ligne pour aller agir sur le relais de la première station, en parcourant successivement les deux fils, pour de là revenir à travers le sol à la pile P′. Ainsi donc, la transmission des dépêches se fait facilement soit de la première station à la seconde, soit de la seconde à la première, et lors même que le courant traverse les relais des deux stations, il n'y a jamais que le relais de la station dont le levier-clef n'est pas baissé qui soit affecté, le relais de la station de départ ne l'étant pas, à cause des deux courants égaux et contraires qui le traversent [2].

[1] Rien n'est plus facile à comprendre que, lorsque deux fils sont enroulés en sens contraire autour d'une bobine, et que ces fils sont unis par leurs extrémités qui sont situées du même côté, le courant qui entre par l'extrémité libre de l'un des fils, et qui sort par l'extrémité libre de l'autre, circulera dans le même sens autour de la bobine, pendant tout son trajet, à travers les deux fils également.

[2] Il faut remarquer qu'à la station, où le levier-clef est au repos, l'extrémité C ou

Maintenant, que se passe-t-il si on ferme en même temps le circuit des deux piles locales aux deux stations, en établissant simultanément à toutes les deux, au moyen des leviers-clefs, la communication entre les pôles négatifs et les conducteurs D et D′ respectivement? Il est évident que les pôles positifs des deux piles qui aboutissent en A et en A′ se trouvent unis par l'un des fils de chaque relais, les fils A B et A′ B′, et par le fil de ligne B B′; d'où résulte que cet ensemble de circuit sera parcouru par deux courants égaux et contraires, ou plutôt qu'aucun courant ne s'y établira. Ainsi, par le fait qu'aux deux stations également le circuit est fermé en même temps, les deux relais qui s'y trouvent sont mis en mouvement, puisque dans tous les deux, l'un des deux courants égaux qui se neutralisaient mutuellement est détruit; mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que le relais de la première station marche par l'effet du courant qui, parcourant le fil AC, revient par le rhéostat au pôle négatif de la pile P, et par conséquent par l'effet du courant de sa pile locale, comme le relais de la seconde station marche aussi par l'effet du courant de sa pile locale. Ainsi, la disposition du système télégraphique est combinée de façon que, lorsque la transmission des deux dépêches est simultanée, l'un des courants égaux de chaque relais est annulé, ce qui détruit l'équilibre et permet au courant non annulé d'agir.

En résumé, il y aura donc transmission des signes, soit qu'on agisse successivement, soit qu'on agisse simultanément sur les leviers-clefs de chaque station : dans le premier cas, par l'effet direct du courant de ligne transmis de la station qui envoie à la station qui reçoit; dans le second cas, par l'annulation des deux courants de ligne qui chemineraient en sens contraire, si cela était possible, et par l'action prépondérante qui en résulte de l'un des deux courants contraires qui parcou-

C′ du second fil du relais communique avec le sol directement, tandis que dès qu'on abaisse le levier-clef, on interrompt cette communication en la remplaçant par celle qui a lieu avec le conducteur D ou D′ par l'intermédiaire du rhéostat. Nous avons déjà vu le levier-clef remplir ce double office.

rent les électro-aimants des relais, et qui, sans cela, se neutraliseraient à chacun des deux relais également. On comprend dès lors que la transmission des dépêches dans l'une des deux directions soit complétement indépendante de la transmission qui a lieu dans l'autre, et que ces deux transmissions puissent s'effectuer en même temps.

Le principe de la méthode consiste, comme nous l'avons dit, dans la division d'un courant en deux circuits particuliers agissant en sens inverse sur l'électro-aimant du relais. MM. Siemens et Halske, qui font usage du rhéostat pour rendre égaux les deux courants partiels, ont soin de placer à chaque station un multiplicateur à deux fils, au moyen duquel ils savent la longueur qu'il faut donner au rhéostat pour ramener à zéro l'action exercée par la pile locale sur l'électro-aimant. M. Wartmann se sert de deux piles locales agissant chacune séparément sur l'un des fils de l'électro-aimant, et dont l'une doit avoir plus de tension que l'autre pour que les deux courants partiels soient égaux. Ce mode, auquel M. Wartmann était arrivé de son côté, est analogue à celui que M. Gintl avait indiqué dans le même but.

Remarquons, en terminant, que le système que nous venons de décrire, quoique extrêmement ingénieux, présente bien quelques objections pratiques. Outre la difficulté non insurmontable, il est vrai, mais assez grande qu'on éprouve à rendre les deux courants égaux à chaque relais, il existe un inconvénient réel dans l'impossibilité où l'on est d'interrompre la transmission d'une dépêche pour demander une explication ou pour réparer une erreur, sans qu'il risque d'en résulter une grande confusion, puisque cette interruption ne peut pas être simultanée des deux côtés. Il est donc probable que, à tout prendre, on préférera avoir double fil et double appareil entre les stations qui ont de trop nombreuses communications entre elles pour que ces communications puissent être successives, au lieu de n'avoir qu'un fil et qu'un système d'appareils pouvant servir à des transmissions simultanées dans des directions opposées.

Nous terminerons ce sujet en disant quelques mots des essais

qui ont été faits pour appliquer la télégraphie à la sécurité des chemins de fer, en mettant en rapport les convois avec les stations vers lesquelles ils se dirigent. Un télégraphe ordinaire, spécialement affecté au service du chemin de fer, peut servir à transmettre de station en station l'annonce de l'arrivée d'un train; mais on a voulu rendre ces indications plus sûres et plus fréquentes en les faisant partir du convoi lui-même. On emploie, sur certaines lignes en Angleterre, le système de M. Tyer, qui consiste à établir des circuits traversant les stations, et qui se ferment en certains points, seulement lorsque le train en passant fait fléchir les rails. Le courant agit alors sur des appareils avertisseurs, *moniteurs* qui constatent ainsi le passage du convoi en certains points connus, et permettent aux employés d'avertir à temps le mécanicien par des signaux, si la voie est obstruée. Au lieu de se servir, pour fermer ces circuits, de la flexion des rails, M. Du Moncel a employé le tender, ou un wagon quelconque du convoi, à mettre pendant un instant en communication les deux extrémités du fil isolé coupé par la voie, au moyen d'un arc métallique également isolé porté par ce wagon. M. Bonelli a proposé de mettre en rapport, d'une manière permanente, soit le train et la station, soit deux trains marchant sur une même voie. Son procédé, qui a été appliqué au chemin de fer de Turin à Gênes, consiste à poser une lame de fer tout le long de la voie entre les deux rails; elle est soutenue à quelques centimètres au-dessus du sol par des supports isolants en terre cuite. Un glissoir métallique fixé à l'un des wagons du convoi met en communication la barre conductrice et un appareil télégraphique placé dans le wagon, et ce même appareil communique avec le sol par l'essieu d'une des roues, la roue elle-même et le rail. Une pile fonctionnant dans la station a l'un de ses pôles relié métalliquement à la barre; le conducteur, qui part de l'autre, passe dans un appareil télégraphique et vient plonger dans le sol. Dès lors, il suffit d'abaisser le glissoir pour que le circuit soit fermé et que le convoi puisse, par conséquent, correspondre avec la station; on conçoit que la même disposition permette de mettre en communication télégraphique deux convois qui marchent tous deux.

Les changements de voie, les croisements de rails, et les passages à niveau présentaient des difficultés pour l'établissement de la barre conductrice; dans ces divers cas, M. Bonelli la fait passer sous le sol en l'enveloppant de gutta-percha.

f. *Emploi de la télégraphie électrique dans les observations scientifiques et plus particulièrement astronomiques.*

Les procédés et les appareils divers que nous venons de décrire, ont été imaginés en vue surtout des services que la télégraphie peut rendre aux relations sociales; cependant la science, et plus particulièrement l'astronomie, y ont trouvé un auxiliaire précieux, pour certaines observations qui exigent une simultanéité d'opérations dans des lieux très-distants, ou une communication immédiate entre deux points très-éloignés. C'est ainsi qu'au moyen de la télégraphie électrique on peut connaître au même instant l'état de l'atmosphère sur plusieurs points du globe terrestre, donnée précieuse pour la météorologie; c'est ainsi également qu'on peut transmettre l'annonce d'un ouragan dans la direction suivant laquelle il se propage, de manière à donner le temps à ceux qui risquent d'en souffrir de prendre les précautions nécessaires. Mais c'est, comme nous l'avons dit, l'astronomie qui a tiré surtout parti de ce mode instantané de communication.

M. Airy, directeur de l'Observatoire royal de Greenwich, est de tous les astronomes celui qui s'est occupé avec le plus de suite et de succès de cette application de la télégraphie électrique, dans laquelle il a été bien vite secondé par le concours des autres astronomes, et en particulier de M. Quetelet et de M. Leverrier. Il a établi à Greenwich un système complet de piles voltaïques toujours montées et prêtes à entrer en action, ayant chacune leur destination spéciale, et composées d'un nombre de couples plus ou moins grand suivant cette destination. De chacune des piles partent des conducteurs en cuivre recouverts de gutta-percha qui aboutissent à un cabinet où, au moyen de commutateurs et autres appareils convena-

bles, le courant reçoit la direction voulue. Ainsi un des courants fait marcher une pendule astronomique, un autre sert à inscrire le passage des étoiles, au moyen de points tracés par un système analogue à celui de M. Morse, sur un papier roulé autour d'un cylindre auquel est imprimé un mouvement de rotation héliçoïdal, et sur lequel sont tracées d'avance des lignes circulaires pour servir de repères; un autre courant sert à transmettre, au moyen de fils télégraphiques, l'heure de Greenwich aux différentes stations télégraphiques de l'Angleterre, et à indiquer en particulier l'heure de midi à Londres en déterminant, à l'instant même du midi de Greenwich, la chute d'une boule placée dans un lieu élevé visible de loin. Il existe encore un nombre considérable d'autres applications aux besoins astronomiques d'une nature analogue, imaginées par M. Airy; nous ne saurions les indiquer toutes sans dépasser les limites entre lesquelles nous sommes obligés de nous restreindre; d'ailleurs elles sont fondées sur les mêmes principes que celles qui nous ont déjà longuement occupés, et n'en diffèrent que par quelques détails mécaniques dans la construction des appareils, faciles à comprendre. Nous nous bornerons donc à insister sur celle de ces applications qui nous paraît présenter le plus d'intérêt et qui a le plus occupé M. Airy, savoir la détermination de la différence de longitude entre les lieux situés à de grandes distances les uns des autres. Mais, avant d'entamer ce sujet, qu'il nous soit permis de signaler l'ordre admirable qui a présidé à l'arrangement des différentes piles, ainsi qu'à la disposition des conducteurs dans l'Observatoire de Greenwich; il est facile d'y reconnaître l'esprit de méthode ainsi que la sagacité pénétrante de l'habile directeur de l'Observatoire, qui a apporté à cette partie de son vaste département scientifique la même précision et la même régularité qui donnent une si grande autorité, par la confiance qu'elles inspirent, aux observations de Greenwich.

C'est en 1852 que furent placés les fils destinés à rattacher l'Observatoire de Greenwich aux principaux bureaux télégraphiques de Londres, par eux d'abord, en 1853, avec les Observatoires de Cambridge et d'Édimbourg, et plus tard avec

ceux du continent, soit avec celui de Bruxelles, soit ensuite avec celui de Paris[1]. Nous entrerons dans quelques détails sur la détermination de la différence de longitude entre Greenwich et Bruxelles, que nous extrayons du Mémoire inséré par M. Airy dans le tome XXIV des *Mémoires de la Société royale astronomique de Londres*. Nous ne nous arrêterons pas sur les détails préliminaires relatifs à la détermination de la correction des pendules, à la manière de fermer les circuits qui devaient l'être par des personnes différentes de celles chargées d'observer les signaux. Nous nous bornerons à remarquer, avant de donner les résultats de l'opération, que les observations avaient été partagées en deux séries, dans l'une desquelles un observateur de Bruxelles observait les signaux télégraphiques ainsi que les passages, par la correction de la pendule à Greenwich,

[1] Le fil qui part de Greenwich passe sous terre jusque près de Blackheath; là il est mis en communication avec un des fils souterrains qui aboutissent au câble électrique, qui lie Londres avec Paris à travers la mer. Au moyen d'un commutateur disposé dans une boîte en fer, qui est elle-même scellée dans un mur du parc de Greenwich, on peut mettre directement en communication le fil télégraphique aboutissant à Paris et celui qui part de l'Observatoire; de manière que les signaux peuvent passer directement de l'Observatoire à Paris, et réciproquement. Pour les usages ordinaires de la télégraphie, le commutateur est placé de manière que Londres et Paris soient liés ensemble, ce qui fait que les signaux télégraphiques sont transmis sans l'intermédiaire de l'Observatoire. Enfin, si Greenwich et Londres sont liés, les signaux peuvent passer entre l'Observatoire et Londres, ou entre l'Observatoire et une place quelconque à laquelle Londres est rattaché. Ainsi pour établir une communication entre l'Observatoire de Greenwich et celui de Bruxelles, il est nécessaire d'établir d'abord la communication entre Greenwich et Londres, et de s'en remettre à l'obligeance des employés du bureau télégraphique de Cornhill à Londres, pour établir une communication temporaire entre le segment du fil télégraphique de Paris, auquel aboutit celui qui part de Greenwich et le fil qui va à Bruxelles, après qu'on a eu le soin de supprimer les relations de ces fils avec la terre. M. Airy avait espéré que la détermination de la différence de longitude entre Paris et Greenwich serait la première application qui serait faite de l'établissement que nous venons de décrire; pendant l'été et l'automne de 1853 des négociations avaient été entamées à ce sujet avec le Bureau des longitudes; mais la maladie de M. Arago et d'autres causes les interrompirent, ce qui fit qu'ayant trouvé M. Quetelet très-désireux de s'occuper de cette entreprise, M. Airy se décida à commencer par la détermination de la différence de longitude entre Greenwich et Bruxelles.

pendant qu'un observateur de Greenwich faisait les observations correspondantes à Bruxelles; on permutait ensuite les observateurs pour faire la seconde série d'observations de la même manière. Ajoutons encore que les signaux consistaient dans les mouvements d'une aiguille aimantée produits par la fermeture du circuit, mouvements qui étaient exactement les mêmes aux deux Observatoires, et sur lesquels devait se concentrer exclusivement toute l'attention des observateurs. Enfin il n'est pas inutile de remarquer que, comme on avait convenu d'éliminer par la permutation des observateurs, les erreurs provenant des équations personnelles et affectant soit les signaux d'observation, soit les passages observés, on ne s'était point mis en mesure d'obtenir une comparaison entre les différentes manières d'observer; ce n'est qu'accidentellement que quelques comparaisons furent faites.

La première détermination importante à obtenir était celle relative à la comparaison des heures des signaux électriques observés à Bruxelles et à Greenwich, qui n'étaient pas accompagnés d'observations de passages d'étoiles; ces observations ne pouvaient donner la différence des longitudes, mais elles étaient nécessaires pour faire connaître le temps employé par le courant électrique, pour sa transmission de Greenwich à Bruxelles, et réciproquement. Un autre point essentiel à connaître, mais d'une nature purement astronomique, était la détermination des éléments nécessaires pour calculer les erreurs de l'instrument des passages, et les erreurs de la pendule, pour les jours dans lesquels se faisaient les observations de la différence de longitude.

Ces précautions prises, deux méthodes ont été suivies pour arriver à la détermination de cette différence. Dans l'une on a employé des passages d'étoiles fondamentales; il n'était pas nécessaire que les étoiles observées fussent les mêmes dans les deux Observatoires. Dans la seconde méthode deux listes d'étoiles étaient préparées, les unes précédant, les autres suivant les signaux. Les positions des étoiles n'étaient pas supposées très-exactement connues; mais avant de s'en servir pour corriger la pendule, les listes des étoiles observées dans les deux

Observatoires étaient comparées, et on rejetait toutes celles qui n'avaient été observées que dans un seul Observatoire. De cette manière, on ne comparait que les passages d'étoiles absolument les mêmes, et l'exactitude de leurs ascensions droites admises était sans importance. Les passages observés ont été corrigés numériquement pour les effets des erreurs des instruments, dont les éléments avaient été déterminés, comme nous l'avons dit; quant aux erreurs de la pendule, elles ont été obtenues en comparant les passages corrigés avec les positions calculées des étoiles; et ces erreurs dûment réduites au temps de chaque signal d'observation, ont été appliquées aux temps donnés par la pendule pour les signaux. La différence de ces temps pour les deux Observatoires donne la différence apparente de longitude, c'est-à-dire la comparaison des temps sidéraux des signaux télégraphiques observés à Bruxelles et à Greenwich. Pour avoir la différence de longitude réelle (encore affectée des équations personnelles [1]), il est nécessaire de prendre la moyenne des résultats séparés qu'on obtient en nombre égal en faisant un même nombre d'observations de Greenwich à Bruxelles, et réciproquement de Bruxelles à Greenwich, afin d'éliminer l'influence du temps employé par le courant pour franchir la distance qui sépare les deux Observatoires. Voici maintenant le résumé des résultats obtenus pour la durée de la transmission du courant électrique, et pour la différence des longitudes.

Le résultat final pour le temps employé par le courant pour franchir la distance qui sépare les deux Observatoires est de $0^s,109$; évaluation qui repose sur 2616 observations; cette durée qui conduirait, si la vitesse du courant était uniforme, à une vitesse de 2500 milles anglais par seconde, puisque la distance télégraphique entre Greenwich et Bruxelles est de 270 milles, serait bien forte comparativement à celle que nous avons obtenue par d'autres méthodes [2].

[1] Nous avons dit comment on se met à l'abri de cette cause d'erreur au moyen de la permutation des observateurs.

[2] Tome II, page 133.

Mais il faut observer que de Greenwich à Londres et de Londres à Ostende, la ligne télégraphique est placée entièrement sous terre ou sous l'eau, ce qui occasionne, comme nous l'avons vu [1], un retard considérable dans la rapidité avec laquelle l'électricité se propage au premier instant où le circuit est fermé. Il est donc très-probable que le retard observé appartient presque entièrement à la partie de la ligne qui passe sous terre ou sous l'eau, et que le retard d'Ostende à Bruxelles, trajet pendant lequel les fils sont dans l'air, est insensible dans la pratique.

Quant à la différence des longitudes entre Greenwich et Bruxelles, les moyennes de 1104 signaux donnent le résultat final de $17^m\,28^s;9$; c'est le meilleur qu'on puisse obtenir dans les circonstances actuelles pour la détermination de l'élément dont il s'agit; il est du reste identiquement le même, suivant la remarque de M. Quetelet, que celui que fournit l'observation de l'éclipse solaire du 15 mai 1856.

M. Airy a déterminé également en 1854, conjointement avec M. Leverrier, la différence de longitude entre l'Observatoire de Greenwich et celui de Paris. La méthode était la même, et consistait dans l'emploi de signaux télégraphiques pour la comparaison des états simultanés des pendules des deux Observatoires. Les signaux eux-mêmes résultaient des déviations de deux aiguilles aimantées, placées dans les deux stations et mises en mouvement par l'action d'un même courant. Les signaux étaient observés par le soin que prenait l'astronome de noter le temps de la pendule auquel ils apparaissaient; mais comme on ne peut compter en général sur une exactitude supérieure à deux dixièmes de seconde dans l'appréciation de l'instant où apparaît un signal ainsi observé, il était nécessaire, pour arriver à une haute précision, de faire usage d'un grand nombre de signaux. M. Faye, comme le remarque M. Leverrier, aurait préféré qu'on recourût à la méthode des coïncidences pour la comparaison des pendules sidérales des deux

[1] Voyez les expériences de Wheatstone (p. 433), à l'occasion des câbles électriques, et celles M. Latimer-Clarck et de M. Faraday, tome II, pages 134 et suiv.

Observatoires; en faisant battre dans chacun d'eux une série de signaux simultanés au moyen d'une pendule de temps moyen, on y aurait observé l'époque de la coïncidence de ces signaux avec la pendule sidérale. L'état relatif des deux pendules en aurait été conclu exactement parce qu'on observe la coïncidence de deux battements avec une précision bien supérieure à celle avec laquelle en estime directement une fraction de seconde de temps.

Cette méthode basée sur la coïncidence des pendules a été également proposée et mise en pratique par M. Thalen à l'Observatoire d'Upsal. C'est en munissant l'extrémité des tiges des deux pendules de petites pointes d'acier, qui plongeaient dans du mercure au moment où les tiges étaient parfaitement verticales, que M. Thalen fermait son circuit, de manière que la coïncidence des deux pendules, quelles que fussent leur distance et leur différence de marche, pouvait être indiquée par l'établissement d'un courant qu'il était facile d'employer, soit par l'aimantation d'un électro-aimant, soit de toute autre manière, à donner un signal. Les états simultanés des horloges au moment de la coïncidence étaient déterminés, soit par les observateurs eux-mêmes, soit par des enregistreurs; il faut remarquer que le courant était interrompu dès que les tiges des pendules, ou seulement une seule, cessaient d'être dans la position verticale.

M. Leverrier de son côté, tout en reconnaissant que la détermination de l'état des horloges par la méthode des coïncidences constituerait un progrès dans le problème des longitudes, fut conduit à penser que la question serait encore plus simplifiée si l'on pouvait se passer complétement de toute détermination de l'état relatif des pendules; et cela en enregistrant sur le même chronographe les observations faites dans les deux stations. Cette méthode ne pouvait offrir en principe aucune objection, puisque l'enregistrement se fait par l'intermédiaire d'un courant qui traverse un fil télégraphique dont la longueur est indifférente. Mais en pratique il se présentait de grandes difficultés qui n'ont été surmontées que graduellement, dans un appareil dont la construction a été confiée à

M. Liais. Sur une bande de papier mise en mouvement par un rouage, une pointe de fer trace des divisions équidistantes correspondantes aux mouvements d'une pendule sidérale, et par l'action même de cette pendule; une ou deux pointes permettent aux observateurs de marquer par des points, au moyen du courant électrique, sur cette même bande de papier, les instants où une même étoile passe aux divers fils de leurs instruments. La différence des stations en longitude s'en conclut, comme on le comprend facilement. Il y a bien des précautions à prendre dans l'emploi de cette méthode qui cependant a permis à M. Leverrier de déterminer, avec une exactitude remarquable, la différence de longitude entre l'Observatoire de Paris et le Dépôt de la guerre où une lunette méridienne avait été installée.

§ 4. Application de l'électro-magnétisme à divers appareils.

Nous avons décrit dans les deux paragraphes qui précèdent les applications des propriétés électro-magnétiques du courant électrique à la production du mouvement en général et à la télégraphie en particulier. Il existe, indépendamment de ces deux genres d'applications, un grand nombre d'appareils plus ou moins usuels fondés sur les mêmes principes. Nous allons chercher à les faire connaître, en insistant plus particulièrement sur ceux qui nous paraissent mériter le plus de fixer l'attention.

Horloges électriques.

L'invention des horloges électriques fut une conséquence naturelle de celle des télégraphes. Plusieurs savants, MM. Wheatstone, Bain, Steinheil, réalisèrent à peu près simultanément le problème dont la solution était de multiplier à volonté les indications d'une seule horloge, qui pût télégraphier d'elle-même l'heure, la minute, la seconde, marquée sur son propre cadran. Il n'est point besoin d'insister sur l'importance de cette application de l'électro-magnétisme, qui permet de faire

marcher en coïncidence toutes les horloges d'un établissement, d'une ville, d'une ligne de chemin de fer, et au moyen de laquelle on pourra conduire la mesure du temps à travers les rues d'une ville, comme on le fait aujourd'hui pour l'eau et pour le gaz.

Avant de faire connaître les appareils qui ont réalisé cette invention, nous parlerons de ce qu'on doit nommer à plus juste titre les horloges électriques, c'est-à-dire d'horloges dans lesquelles la force motrice, poids ou ressort dans les mouvements ordinaires, est une force électro-magnétique. Cette seconde invention ne présente pas évidemment autant d'intérêt que la première, et d'ailleurs l'électricité, appliquée dans ce cas pour développer une force motrice, entraîne avec elle l'inconvénient d'une dépense continuelle, que l'emploi d'un poids ou d'un ressort que l'on remonte ne nécessite pas. Toutefois des appareils très-ingénieux et remarquables par leur simplicité ont été inventés, et l'on est parvenu à les faire marcher avec une grande régularité.

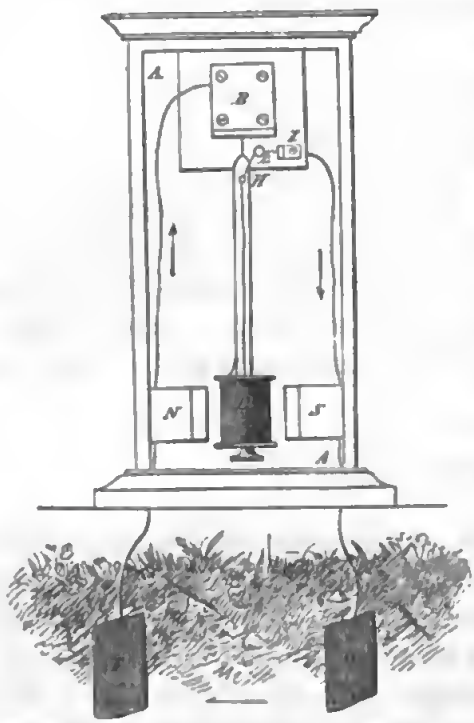


Fig. 400.

La figure 400 représente la pendule de M. Bain, une des premières qui aient été construites, et dans laquelle c'est l'action de deux aimants permanents sur une hélice ou bobine, parcourue par un courant, qui entretient le mouvement du pendule. Un fil conducteur communiquant avec l'extrémité du ressort auquel est suspendu le pendule passe derrière sa tige, vient s'enrouler en spirale autour de la lentille, de ma-

nière à former une hélice horizontale, et remonte en H où il se relie à un ressort qui porte à son extrémité une petite boule de platine E. N et S sont les pôles nord et sud de deux aimants entre lesquels le pendule oscille ; enfin les pôles de la pile qui, dans la figure, se compose d'une plaque de zinc et d'une plaque de cuivre enfouies dans le sol, communiquent avec les points I et B. Chaque fois que le pendule, en oscillant, arrive à l'extrémité droite de sa course, le contact s'établit entre I et E, le circuit est fermé, le courant passe et la bobine est repoussée à gauche à la fois par l'action répulsive du pôle S et l'action attractive du pôle N. Le mouvement de va-et-vient du pendule se transforme en un mouvement de rotation au moyen d'une ancre agissant sur une roue dentée, comme cela a lieu dans le récepteur du télégraphe à cadran.

On a construit d'autres horloges électriques reposant sur le même principe, c'est-à-dire dans lesquelles l'action directe d'une force électro-magnétique entretenait les oscillations du pendule ; mais on conçoit que la constance de l'impulsion ainsi donnée dépend de la constance de la force magnétique, et que cette impulsion doit par conséquent varier avec l'intensité du courant électrique. On a réussi à rendre la marche de l'appareil indépendante de cet élément en donnant au pendule des impulsions toujours égales par l'effet d'un poids qui agit sur lui, et en se servant seulement de l'électricité pour déterminer l'action du poids.

Voici le mécanisme ingénieux qu'a inventé M. Froment (fig. 401). Le pendule *a b* est suspendu par le ressort *r* à une pièce métallique fixe, et porte de côté une petite vis *e d* ; le fil entourant la bobine de l'électro-aimant *g* a l'un de ses bouts en *f*, et l'autre communique avec la pièce mobile *h* ; celle-ci se termine à son extrémité par le poids *i*, et c'est lorsque la vis *e d* vient en contact avec lui que le circuit se ferme. L'armure de l'électro-aimant est une pièce mobile autour de *k*, dont la course est réglée par les deux pointes entre lesquelles se trouve son extrémité *l* ; enfin les deux pôles de la pile sont en *n* et *p*, et les fils *m m'* complètent le circuit, en faisant passer le courant, comme nous le verrons tout à l'heure, dans l'appareil indica-

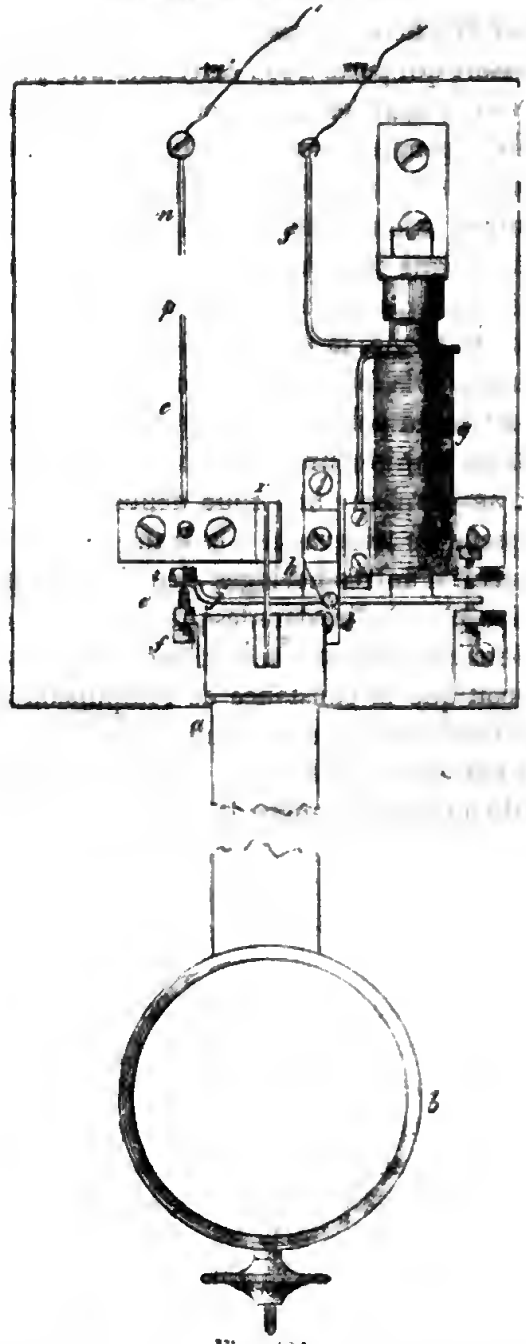


Fig. 401.

teur. Supposons le peu lule écarté à droite de sa position verticale; il y revient et la dépasse. La vis *e d* arrivant à une cer-

taine hauteur, soulève le poids *i* que l'armature de l'électro-aimant avait supporté jusque-là; à partir de ce moment le courant passe, l'armature est attirée, son extrémité *j* descend, ce qui fait que lorsque le pendule, après avoir atteint l'extrémité de sa course, revient à droite, le poids *i* ne retrouve que plus bas l'armature pour le soutenir, et accompagne par conséquent le pendule plus longtemps en descendant qu'en montant. Il en résulte une impulsion donnée au mouvement à chaque oscillation, et l'on conçoit qu'il soit possible, en réglant la course de l'armature, de conserver à l'oscillation exactement la durée voulue, celle d'une seconde par exemple. Au moyen de l'appareil que nous venons de décrire, on a donc un courant qui s'établit et cesse une fois par seconde. Le fil conducteur, dont nous avons représenté les deux extrémités en *m* et *m'*, vient passer dans l'appareil indicateur (fig. 402), et y former un double électro-aimant devant lequel est une armure mobile. Lorsque le courant passe, l'armure est attirée et elle agit sur un système de leviers articulés, dont le dernier pousse une roue munie de 60 dents; cette disposition a l'avantage de remplacer par une pression graduée le choc qui aurait lieu si l'armature agissait directement sur la roue; enfin un ressort qui presse sur les dents, sert à la fois de modérateur pour la vitesse et d'arrêt après le passage de chaque dent. Puisque la roue a 60 dents, et que le courant passe une fois par seconde, elle fera un tour par minute, et dès lors on comprend qu'une disposition analogue à celle des horloges ordinaires donne les roues dont les axes conduisent les aiguilles des minutes et des heures. Il faut remarquer qu'il sera facile d'avoir autant d'appareils indicateurs que l'on voudra, et que leur nombre et leurs distances respectives ne seront limités que par l'intensité du courant.

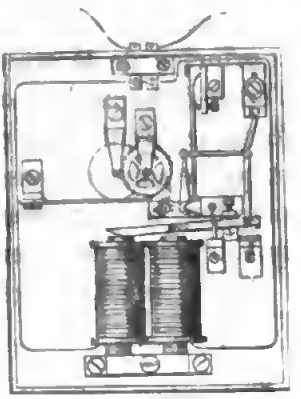


Fig. 402.

Nous avons décrit l'horloge de M. Bain, pour sa priorité dans cette application de l'électro-magnétisme et celle de M. Fro-

ment dont le mécanisme nous paraît le plus ingénieux et le plus satisfaisant. Nous citerons encore les noms de MM. Robert-Houdin, Vérité et Garnier, comme ceux d'auteurs de perfectionnements divers dans ce genre d'applications.

Nous en venons maintenant à la question dont nous avons parlé d'abord, et nous allons étudier quelques-uns des appareils horaires ou compteurs électro-magnétiques, qui marchent simultanément avec une horloge type et ne font, pour ainsi dire, que transporter ses indications. En décrivant l'horloge électrique de M. Froment, nous avons déjà étudié le procédé qu'il suit pour transmettre à un nombre quelconque d'appareils compteurs les battements isochrones de son pendule. Lorsque l'horloge a pour moteur un ressort ou un poids, le principe de la transmission n'en reste pas moins le même, c'est-à-dire que le mouvement de l'appareil type ouvre et referme le circuit d'un courant à des intervalles de temps égaux, et que ce courant, passant par les appareils indicateurs, y fait marcher les aiguilles par un mécanisme analogue à celui qu'emploie M. Froment.

La figure 403 représente le système de M. Bain. Au milieu

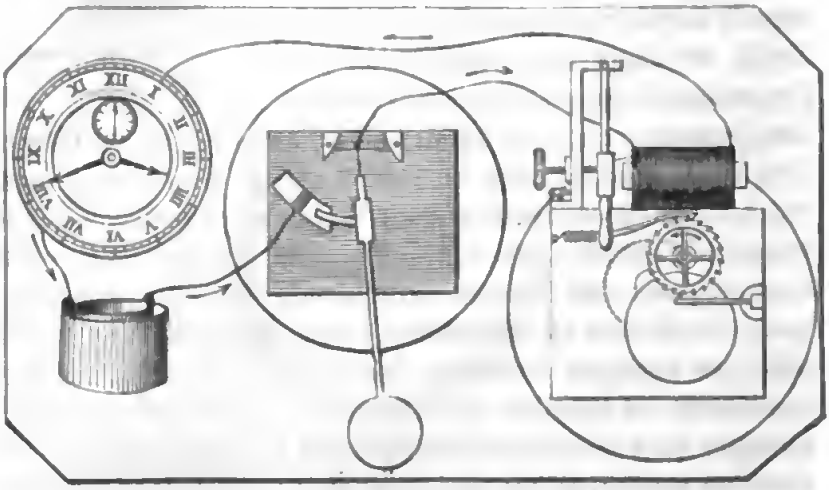


Fig. 403.

se trouve figurée une horloge ordinaire vue par derrière et dont le pendule bat la seconde; à droite et à gauche, on a re-

présenté deux appareils horaires, l'un avec son cadran, l'autre avec les détails du mécanisme qui le fait marcher; enfin, à gauche est la pile qui ne se compose ici que d'un seul couple. Un ressort très-léger est fixé au pendule, et à chaque oscillation il arrive en contact avec une pièce métallique à laquelle aboutit une des extrémités du conducteur, tandis que l'autre communique avec la tige du pendule, en sorte que le circuit se trouve fermé une fois par seconde. D'autre part, à la simple inspection de la figure du compteur, on voit comment, à chaque aimantation de l'électro-aimant, l'armature entraîne le crochet qui s'engage dans une nouvelle dent, et comment, lorsque l'aimantation cesse, le ressort fait marcher la roue de toute l'épaisseur de cette dent.

Pour faire marcher à la fois un grand nombre d'horloges électriques, il faudrait une pile puissante; on peut faire agir l'électricité successivement dans chacune d'elles, ce qui nécessite un courant beaucoup moins intense. Mais elles ne donnent plus alors l'indication des secondes. La figure 404 montre le régu-

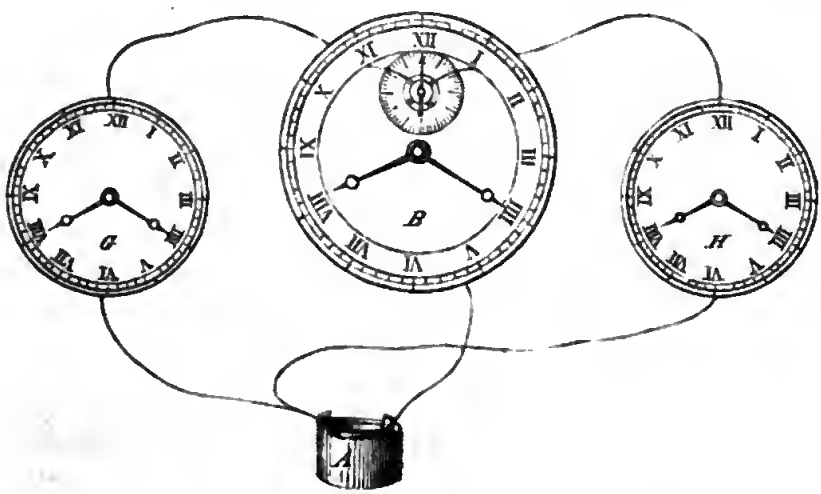


Fig. 404.

lateur ou horloge type sur le cadran de laquelle est fixé un petit cercle en ivoire avec des secteurs métalliques, en nombre égal à celui des appareils indicateurs dont on veut pouvoir disposer. Sur ce cercle, et en contact avec lui par un petit

ressort, se meut l'aiguille des secondes, qui d'autre part sert à fermer le circuit. Chaque fois que l'aiguille passe sur un secteur en cuivre, le courant traverse l'appareil indicateur correspondant à ce secteur-là; or, l'aiguille des secondes accomplissant une révolution par minute, il s'ensuit que pendant la durée d'une minute, le courant passe une fois dans chacun des indicateurs, ce qui fait dans chacun avancer d'une dent une roue qui en a 60, et qui porte l'aiguille des minutes.

On doit à M. Paul Garnier un système d'horloges électriques adopté aujourd'hui dans plusieurs localités. L'horloge primitive se compose de deux rouages différents ; l'un est destiné, comme dans les horloges ordinaires, à entretenir le mouvement du pendule; l'autre a pour but de produire la rupture et le passage du courant, et il est soumis à la marche du premier de telle manière que son dernier axe qui porte un moulinet, représenté figure 405, suit le mouvement de la roue

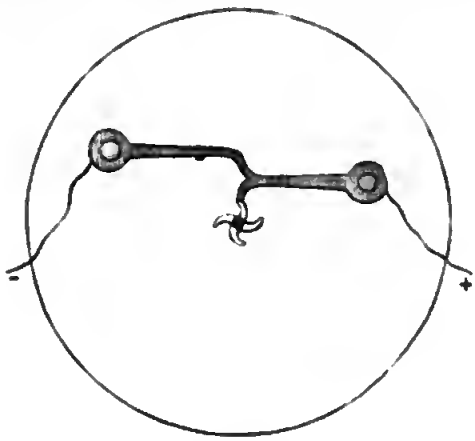


Fig. 405.

d'échappement. Deux leviers, à travers lesquels le courant doit passer, viennent en contact lorsque le moulinet soulève celui qui s'appuie sur lui, et de cette manière le courant passe à des intervalles de temps égaux dans les électro-aimants des appareils indicateurs. Nous avons représenté l'un de ceux qui sont employés par M. Garnier (fig. 406). Cette figure montre assez d'elle-même comment la roue à rochets marche d'une dent chaque fois que l'armature est attirée. M. Garnier dispose ses

appareils, en ne transmettant dans chaque appareil indicateur qu'un courant dérivé du courant principal qui passe dans

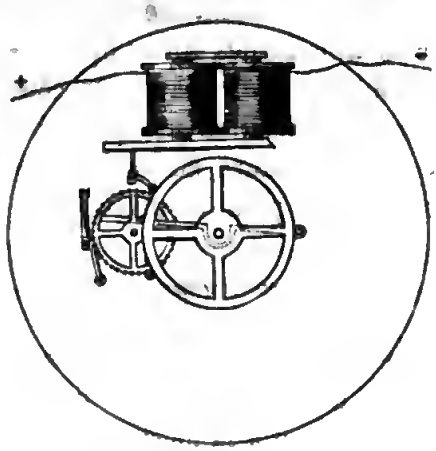


Fig. 406.

l'horloge type; de cette manière l'un d'eux peut cesser de fonctionner sans que la marche des autres s'en ressente.

Nous terminons ce sujet en disant quelques mots d'un mécanisme destiné à faire marcher d'accord des horloges ou des pendules ordinaires, en les réglant à chaque heure, par le passage d'un courant électrique, sur une horloge régulatrice. La figure 407 représente une de ces horloges dont on a enlevé

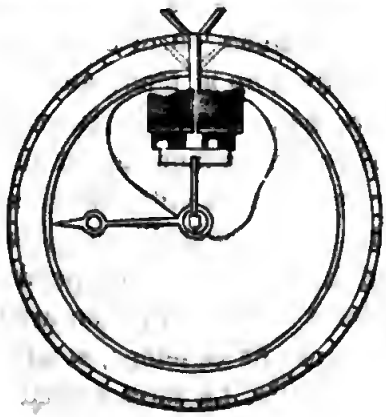


Fig. 407.

le cadran ainsi que l'aiguille des minutes, laquelle porte près de son extrémité une petite cheville perpendiculaire au plan du cadran et destinée à s'engager dans la fourchette que l'on

voit représentée. Cette fourchette occupe d'ordinaire la position tracée en lignes ponctuées, mais à la dernière seconde de chaque heure, l'horloge régulatrice fait passer un courant dans tous les électro-aimants des autres appareils chronométriques, l'armature soulevée dans chacun de ceux-ci entraîne la fourchette, qui prend la position indiquée dans la figure, et qui ramène, par l'intermédiaire de la cheville, l'aiguille des minutes exactement sur le point de midi.

Chronoscopes.

On a donné le nom de chronoscope à des instruments qui servent à apprécier la durée d'intervalles de temps très-courts, et qu'on a appliqués surtout à la mesure de la vitesse des projectiles. M. Wheatstone paraît être le premier qui ait essayé de se servir dans ce but des propriétés du courant électrique; MM. Pouillet, Bréguet, Siemens, Henry se sont occupés depuis lors de ce sujet.

L'appareil de M. Wheatstone, au moyen duquel on mesure la vitesse d'un boulet, se compose d'un mouvement d'horlogerie, dont la marche est arrêtée par un cliquet en fer doux, maintenu dans sa position par l'attraction d'un électro-aimant. Le circuit à travers lequel passe le courant qui l'aimante se trouve interrompu au moment où le boulet sort de la bouche du canon par la rupture d'un fil tendu au travers, et il est rétabli à l'instant où ce même boulet arrive contre la cible disposée de façon que le moindre mouvement qu'on lui imprime, établisse un contact permanent entre un ressort et une autre pièce métallique. Le mouvement d'horlogerie et l'aiguille indicatrice qu'il conduit, marchent ainsi pendant le temps qui s'écoule entre le départ du boulet et son arrivée à la cible, en sorte que l'on a la mesure de ce temps, et par conséquent celle de la vitesse du projectile. La force coërcitive du fer doux, qui fait que l'électro-aimant ne cesse pas d'attirer son armature du moment où le courant cesse de passer, était dans cet appareil une cause d'erreur assez grave; M. Wheatstone est parvenu à la faire disparaître à peu près complétement.

L'appareil inventé par M. Bréguet repose absolument sur le même principe; c'est un cyliudre animé d'un mouvement de rotation, sur lequel s'appliquent des styles placés le long d'une même génératrice du cylindre, lorsqu'ils ne sont plus retenus par leurs électro-aimants respectifs; le boulet, en traversant des cibles placées à des distances connues, coupe successivement les circuits des courants qui passent dans ces électro-aimants. Comme on connaît la vitesse de rotation du cylindre, on conclut, de l'angle dont il a tourné entre les marques de deux styles, le temps qu'a pris le boulet pour parcourir la distance des deux cibles correspondantes. La disposition proposée par M. Siemens consiste aussi à avoir un cylindre tournant, mais ce sont les décharges de deux bouteilles de Leyde, que détermine le projectile en deux points donnés de sa trajectoire, qui produisent, par leurs étincelles, deux taches sur le cylindre d'acier poli.

Ainsi, dans ces applications à la détermination d'un intervalle de temps très-court, l'électricité ne sert que d'intermédiaire entre le projectile et l'appareil compteur, intermédiaire précieux, car l'on conçoit qu'il serait difficile de réaliser une disposition mécanique dans laquelle le choc du boulet se transformerait en une simple pression sur un rouage.

Le chronoscope inventé par M. Pouillet est fondé sur un tout autre principe; son procédé consiste à mesurer le temps pendant lequel un courant circule dans un galvanomètre, par l'amplitude de la déviation de l'aiguille aimantée. Pour trouver la relation qui existe entre la durée d'un courant électrique et son effet sur le galvanomètre, M. Pouillet a employé un plateau circulaire de verre, sur lequel est collée une lame d'étain suivant un rayon du cercle communiquant métalliquement avec son axe. Supposons qu'on imprime au plateau un mouvement rapide de rotation, et qu'on mette en communication, avec les deux pôles d'une pile, l'axe de l'appareil et un ressort qui s'appuie sur la circonférence du disque, le circuit ne sera fermé que pendant le passage de la bande d'étain sous le ressort. De la vitesse de rotation et de la largeur de la bande d'étain, on conclut la durée du courant en même temps qu'on mesure son

effet sur un galvanomètre; c'est ainsi que M. Pouillet a pu constater qu'un galvanomètre de Melloni donne 15° de déviation, lorsqu'on fait agir sur lui, pendant $\frac{1}{1500}$ de seconde, le courant d'un seul élément de Daniell, et qu'il a gradué cet instrument en faisant varier, soit la durée, soit l'intensité du courant. M. Pouillet s'est servi de ce procédé pour mesurer le temps que met une balle à sortir du canon d'un fusil. Les deux extrémités d'un circuit (fig. 408), dans lequel se trouvent le galvanomètre et un élément de Daniell, viennent s'adapter, l'une à la capsule mise en place sur la cheminée, l'autre au

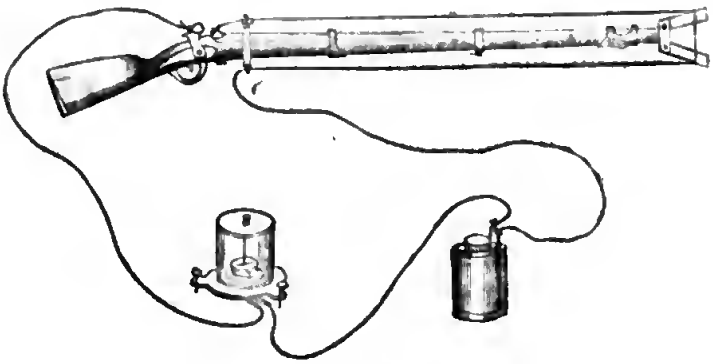


Fig. 408.

chien du fusil, toute la batterie étant bien isolée du canon; le fil passe devant le bout du canon, de façon à être coupé par la balle au moment où elle sort. Lorsqu'on tire, le courant passe pendant le temps qui s'écoule entre l'instant où le chien touche la capsule et celui où la balle sort du canon. D'après les expériences de M. Pouillet, ce temps s'est toujours trouvé compris entre $\frac{1}{140}$ et $\frac{1}{150}$ de seconde; on conçoit qu'il suffit d'une disposition de cibles analogue à celle dont nous avons parlé plus haut, pour appliquer ce même principe à la mesure de la vitesse d'un projectile en divers points de sa trajectoire.

Sonneries électriques.

Nous avons vu que sur toute ligne télégraphique, quel que soit le système employé, il y a toujours, à côté du récepteur,

un appareil nommé l'alarme, dans lequel un marteau frappant sur un timbre est mis en mouvement dès qu'un courant passe dans le circuit télégraphique, et avertit ainsi l'employé qu'on va lui transmettre une dépêche. Ces appareils, pour lesquels on a proposé divers modèles, consistent tous dans un mouvement d'horlogerie, auquel l'armature d'un électro-aimant sert d'arrêt, de façon qu'il ne marche que pendant le passage du courant. M. Mirand a appliqué avec succès le principe des sonneries électriques pour remplacer, dans le service des maisons et des hôtels surtout, les sonnettes ordinaires. L'appareil qu'il emploie est tout à fait analogue à l'interrupteur [1], dans lequel une armature oscille devant les pôles d'un double électro-aimant pendant tout le temps qu'un courant l'aimante ; ici l'armature est liée à un marteau frappant sur un timbre, et ce marteau, suivant qu'on ne fait passer le courant que durant un instant ou qu'on le laisse circuler plus longtemps, frappe un coup, ou produit par la succession rapide de ses percussions un roulement sonore. Dans chaque chambre que l'on veut mettre en communication avec l'appareil, on dispose contre la paroi un disque de bois au milieu duquel est un bouton d'ivoire; en appuyant sur ce bouton, on ferme le circuit qui passe par l'appareil sonneur. Par cette disposition, on peut non-seulement sonner comme on le fait avec une sonnette ordinaire, mais donner des ordres, en se servant de certaines conventions pour faire succéder les coups isolés et les roulements.

Tissage électrique.

L'application de l'électro-magnétisme au tissage, trouvée il y a quelques années par M. Bonelli, doit être considérée à juste titre comme une grande et belle invention. Bien que le métier électrique, au point où l'a amené son inventeur, ne puisse encore remplacer avantageusement sous tous les rapports le système Jacquard, il n'en est pas moins une application évidemment utile de l'électricité, dont les propriétés caractéristiques

[1] Voyez tome I, page 291.

y trouvent leur emploi, et il est plus que probable que des perfectionnements progressifs dans la disposition et les détails de l'appareil finiront par lui donner sur le métier employé aujourd'hui une supériorité marquée.

Pour étudier l'invention de M. Bonelli, il est indispensable de donner d'abord une idée générale du métier Jacquard et de la manière dont il fonctionne. On sait qu'un tissu se compose de deux séries de fils placés les uns à côté des autres dans deux directions perpendiculaires entre elles et s'entrelaçant de manière à donner la solidité à l'étoffe. Dans le tissage, les fils de l'un des systèmes sont longitudinaux, isolés les uns des autres et tendus parallèlement dans un même plan horizontal; ils constituent la *chaîne*. Ce sont, dans la figure 409, les fils *ff*, etc.; les fils du second système entrelacent transversalement ceux du premier et sont formés par un seul fil replié successivement sur lui-même comme le montre la figure; ils constituent la *trame*, et une seule course de trame égale à la largeur de la chaîne est désignée sous le nom de *duite*.

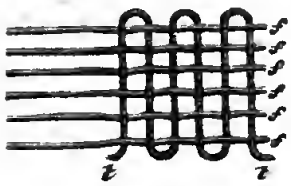


Fig. 409.

L'opération du tissage consiste à soulever un certain nombre de fils de la chaîne et à faire passer entre les fils soulevés et ceux qui sont restés dans le plan horizontal, le fil de trame conduit par un petit appareil à l'intérieur duquel il se dévide et qu'on nomme *navette*; quand la navette a passé, les fils soulevés retombent et une duite est tissée. Tant qu'il ne s'agit que d'une étoffe unie, le fil de trame devant passer régulièrement dessus et dessous les fils consécutifs de la chaîne comme le représente la figure 409, l'opération n'est pas difficile à réaliser, et l'on conçoit facilement que tous les fils de numéros pairs étant reliés à une même tige rigide horizontale, tandis que tous les fils de numéros impairs le sont à une autre, l'élévation successive des deux tiges produise celle des deux séries de fils entre lesquelles la navette doit passer. Mais pour les étoffes façonnées, sur lesquelles les dessins sont obtenus par l'entrelacement de fils colorés d'avance, le fil de trame doit, pour chaque duite, laisser apparaître certains fils de la chaîne

qui, par leur position et leur couleur, se rapportent à la figure que l'on veut tracer; dès lors, comme on le comprend, le soulèvement des fils de la chaîne ne peut plus se faire d'une manière régulière par numéros pairs et impairs, et chaque coup de navette doit être précédé d'un choix minutieux et compliqué des fils à soulever et à laisser. C'est là ce qui constituait le métier des *tireurs de lacs* avant la belle invention de Jacquard.

La figure 410 représente la disposition affectée à chaque fil de la chaîne, dans le métier à tisser, vue de deux côtés différents. Le fil horizontal *f* passe dans un support en verre *m* nommé *maillon*, auquel est suspendu un cylindre de plomb *p*; le maillon est relié par une attache ou *lisse* L à la tige verticale *c*, qui passe sans frottement dans l'anneau *b* d'une tige horizontale *h*, et se termine, à sa partie supérieure, par un crochet très-ouvert *r*; ce crochet repose sur une lame *l*, posée un peu de biseau, de façon que le moindre mouvement latéral donné à la tige *c* suffise pour dégager le crochet de son point d'appui. La figure 411 montre la disposition des tiges verticales ou *aiguilles*, qui sont rangées dans un certain nombre de plans verticaux parallèles à celui de la figure; chacune des tiges horizontales *h* est engagée à droite dans un étui où elle est appuyée contre un ressort. Voici maintenant comment il se fait que certains fils déterminés sont soulevés à chaque duite pour laisser passer la navette et produire le dessin voulu. Un prisme en bois R, animé d'un mouvement latéral de droite à gauche, vient présenter contre l'extrémité des tiges horizontales sa face percée de trous correspondant à ces tiges, mais recouverte d'une bande de carton qui, percée elle-même d'un certain nombre de trous, laisse ouverts ceux qui leur correspondent dans le prisme et ferme les autres; les tiges horizontales devant lesquelles les ouvertures des prismes sont fermées sont repoussées à gauche,

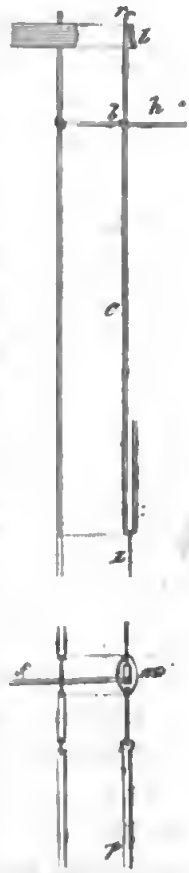


Fig. 410.

et chacune dégage son aiguille de la lame *l*, qui était engagée sous son crochet. A cet instant, ces lames *l* s'élèvent avec le

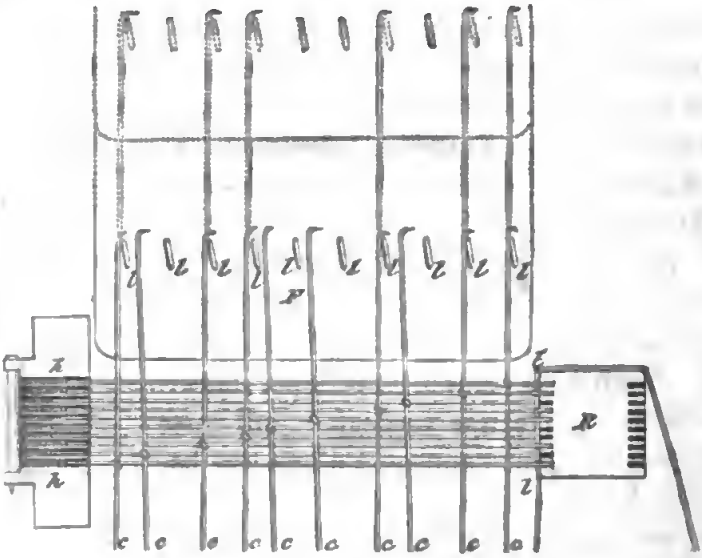


Fig. 411.

châssis F auquel elles sont fixées, et elles ne soulèvent que les aiguilles dont les tiges horizontales ont trouvé des trous dans le carton; la navette passe, le châssis retombe, puis la même opération recommence; seulement le prisme R a tourné d'un quart de circonférence, et c'est un nouveau carton qui se présente correspondant à la nouvelle duite; toutes ces bandes de carton forment une longue chaîne conduite par le prisme R et un cylindre; on voit qu'il en faut un pour chaque fil transversal du tissu, ce qui fait que certains dessins en exigent jusqu'à 100,000; on conçoit combien une chaîne pareille doit être embarrassante à manœuvrer, quelle place elle doit tenir, et le prix énorme auquel revient la mise en carte d'un dessin compliqué, opération qui exige des ouvriers habiles.

Au lieu de cartons, M. Bonelli prend un papier métallique et y trace, avec un vernis isolant le dessin qu'il veut reproduire sur l'étoffe. Voici le principe de son invention. Supposons un nombre d'électro-aimants égal à celui des aiguilles *c* du métier Jacquard, et admettons que, par une disposition quel-

conque, le fil qui entoure chaque bobine ait une de ses extrémités toujours en contact avec le pôle d'une pile, et l'autre avec le papier dont nous venons de parler; le second pôle de la pile communique avec la surface métallique de ce même papier, qui reçoit un mouvement de translation. Par l'effet de ce mouvement, le fil d'un électro-aimant quelconque sera en contact tantôt avec une partie métallique, tantôt avec une partie non conductrice, suivant la configuration du dessin; dans le premier cas, le courant passera dans cet électro-aimant; dans le second, il ne passera pas. Il ne s'agit plus que de mettre en rapport, par un mécanisme plus ou moins ingénieux, chaque électro-aimant avec une aiguille verticale, en se servant de l'électro-magnétisme développé dans l'un des cas et non dans l'autre, pour que l'électro-aimant soulève l'aiguille ou la laisse, suivant que le courant passe ou ne passe pas. Supposons une chaîne blanche avec une trame noire, et considérons un des fils de la chaîne; ce fil sera recouvert par la trame ou se montrera, suivant que le conducteur aboutissant à l'électro-aimant qui lui correspond sera en contact, le long de la ligne qu'il trace sur le dessin type, avec une surface de métal ou de vernis; la ligne formée sur le tissu par ce fil de la chaîne reproduit donc, par un changement de couleur en passant du blanc au noir ou du noir au blanc, chaque passage de l'une des surfaces à l'autre sur une ligne qui lui correspond dans le dessin type. Ainsi la figure est reproduite; les proportions seules varient avec la vitesse du mouvement que l'on imprime au papier.

La figure 412 indique la disposition que M. Bonelli avait adoptée dans son premier essai; une aiguille verticale est supportée sur le châssis *ab* par un petit cylindre en fer doux *f*; *e* est l'électro-aimant correspondant à l'aiguille; le fil qui l'entoure a l'une de ses extrémités sur la tige métallique *cd*, qui supporte toute une rangée d'électro-aimants et qui est cons-

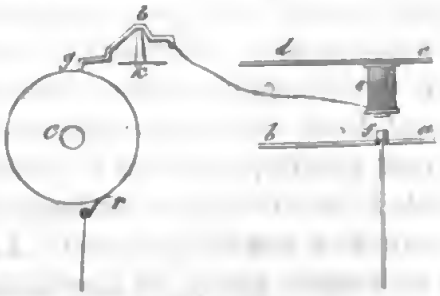


Fig. 412.

tamment en communication avec l'un des pôles de la pile, et l'autre vient s'attacher à la lame métallique *l*. Toutes ces lames placées de tranchant sur un support K, et séparées entre elles par des feuilles de carton, forment une sorte de peigne dont les dents *g* viennent en contact avec le cylindre *c* lorsque le support s'abaisse; le cylindre est recouvert du dessin type, et un ressort *r* met le second pôle de la pile en communication avec la surface métallique du papier. Pour chaque coup de navette, le châssis *ab* élève les aiguilles, et tous les fers doux viennent en contact avec leurs électro-aimants respectifs; à ce moment, le peigne s'abaisse et le cylindre, qu'un mécanisme fait tourner d'un cran par chaque coup de trame, présente sous les lames la ligne transversale du dessin qui se rapporte à la duite qui va se tisser. Toutes les dents qui sont en contact avec la partie métallique du papier laissent passer le courant; et, lorsque le châssis redescend, les aiguilles correspondantes à ces lames restent suspendues à leurs électro-aimants.

Dans cette disposition, la force magnétique de chaque électro-aimant devait être suffisante pour qu'il pût supporter le poids de l'aiguille et du cylindre de plomb suspendu à chaque fil. Il fallait donc, d'une part, lui donner des dimensions relativement considérables, ce qui nécessitait l'écartement des aiguilles, et de l'autre, employer des courants d'une certaine intensité, ce qui, indépendamment de la dépense, détériore facilement les appareils.

M. Bonelli fut donc conduit à adopter une autre disposition, dans laquelle l'électro-magnétisme joue exactement le rôle des cartons du métier Jacquard. Les électro-aimants n'ont plus sur les aiguilles qu'une action latérale, en les dégageant, à un moment donné, du support qui les soulève. C'était là déjà un grand progrès, en ce sens qu'on doit épargner autant que possible à l'électricité tout développement de force mécanique et se servir de sa propriété essentielle, l'instantanéité, pour changer, à un moment donné, les dispositions relatives des pièces d'une machine. Dans la figure 413, *h* est une tige horizontale du métier Jacquard (Voyez fig. 411), vue de haut en bas, *e* est l'élec-

tro-aimant correspondant ; à côté de son pôle se trouve l'extrémité en fer doux d'un levier qui, par un renvoi de mouve-

Fig. 413.

ment, communique avec *h*. Lorsque l'armure est attirée, la tige *h* reçoit un mouvement latéral de gauche à droite, et elle dégage de son support l'aiguille qui lui est liée, absolument de la même manière qu'elle le fait dans le métier Jacquard lorsqu'elle est repoussée par les cartons. M. Bonelli modifia aussi la nature du papier qui recouvre le cylindre. Sur du papier ordinaire, on trace avec du vernis le dessin qui doit être reproduit, puis on le recouvre d'une mince feuille d'étain, avec lequel on le laisse en contact pendant un certain temps; en frottant ensuite le papier avec un tampon de coton, l'étain reste adhérent au vernis, et disparaît où il n'y en a pas.

C'est de cette manière que fonctionnait le métier que M. Bonelli a fait monter à Paris; nous n'entrerons pas dans tous les détails de l'appareil, ce qui nous entraînerait trop loin; d'ailleurs, M. Bonelli reconnaissait lui-même qu'il y avait encore à surmonter un grand nombre de difficultés.

M. Froment s'occupe actuellement des modifications à faire subir à l'appareil de M. Bonelli. Dans celui qu'il se propose de construire, l'action magnétique aura lieu suivant l'axe de l'électro-aimant qui sera horizontal, et non pas latéralement (Voyez fig. 413). M. Bonelli avait été empêché d'adopter cette disposition par l'impossibilité de donner à ses électro-aimants un diamètre assez petit pour qu'ils fussent chacun vis-à-vis de leurs tiges correspondantes ; mais M. Froment surmonte cette difficulté en diminuant encore la force magnétique que devra développer chaque électro-aimant. La figure 414 indique le principe de la disposition qu'il compte employer. Devant chaque électro-aimant, se trouve une tige horizontale terminée d'un

côté par une pièce de fer doux, et en *t* par un petit cylindre de cuivre ou tête. Toutes ces tiges peuvent se mouvoir latéralement dans le châssis C qui les supporte, et ce châssis lui-même est susceptible de prendre un mouvement de translation. Pour

Fig. 414.

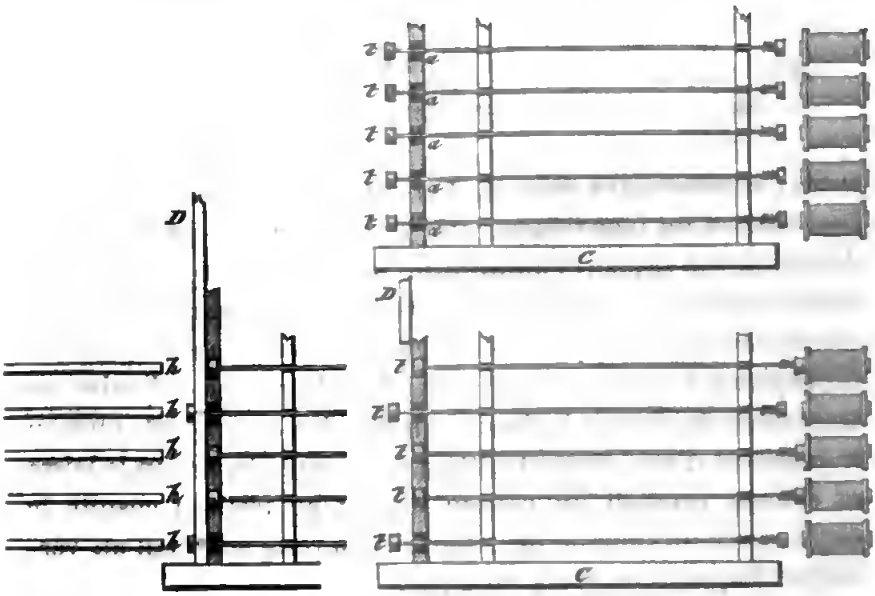


Fig. 415.

chaque coup de trame, il s'avance d'abord de gauche à droite, et vient appliquer tous les fers doux contre les pôles de leurs électro-aimants respectifs, puis il repart en sens contraire et n'entraîne avec lui que les tiges appliquées contre les électro-aimants inactifs. Lorsque le châssis s'est éloigné suffisamment pour que les têtes *c* des tiges restées adhérentes aient passé dans les ouvertures *a*, le courant cesse partout et le châssis continue à s'avancer en emportant avec lui toutes les tiges dans les positions respectives qu'elles y ont prises ; à ce moment, une coulisse D s'abaisse et vient fermer les ouvertures devant les têtes des tiges restées dans le châssis, en même temps qu'elle sert d'appui à celles qui sont en dehors (fig. 415). C'est alors que la paroi du châssis qui s'avance toujours vient rencontrer les extrémités des tiges horizontales *h* du métier et qu'elle agit sur elles comme le carton Jacquard, en poussant latéralement celles

qui correspondent à des têtes *c* restées hors du châssis. Ainsi l'électro-magnétisme n'aura plus à vaincre que la faible résistance des petites tiges sur leurs glissières, et M. Froment, tout en donnant à ses électro-aimants une puissance d'action très-supérieure à celle qui leur est nécessaire, peut rendre leurs dimensions suffisamment petites pour les placer chacun vis-à-vis de la tige horizontale correspondante. Les perfectionnements porteront aussi sur le mode de communication des fils avec le papier métallique; en outre, un commutateur fermera le circuit un instant après le contact des dents avec le dessin type et le rompra un instant avant que ce contact cesse; cette disposition fera disparaître les étincelles d'induction qui finissaient par détériorer le papier.

Dans l'exposé que nous avons donné de l'invention de M. Bonelli, il est un certain nombre de détails se rapportant spécialement à l'art du tissage, dans lesquels nous n'avons pu entrer. Il nous semble qu'on ne doit voir logiquement dans ces difficultés aucune que le métier électrique ne puisse surmonter, comme l'a fait le métier Jacquard; puisque en définitive un carton n'est susceptible que de présenter des parties pleines et des parties vides, comme le papier qui le remplace présente des parties conductrices et d'autres qui ne le sont pas.

Appareil pour entretenir le mouvement du pendule Foucault.

Dans la belle expérience imaginée par M. Foucault, où l'invariabilité du plan d'oscillation d'un pendule donne la démonstration de la rotation de la terre, l'amplitude des mouvements du pendule diminue peu à peu à cause de la résistance de l'air. M. Foucault a trouvé un moyen très-ingénieux de conserver indéfiniment cette amplitude sans influer en rien sur la direction du plan d'oscillation, en se servant de l'attraction exercée par un électro-aimant sur la sphère qui se meut sous l'action de la pesanteur. Cette application de l'électro-magnétisme a ceci de remarquable, qu'elle présente le premier exemple d'un

commutateur fonctionnant sans qu'il y ait contact entre la partie fixe de l'appareil et celle qui est en mouvement.

La figure 416 représente la disposition adoptée par M. Foucault, d'après un dessin qu'il a bien voulu nous communiquer.

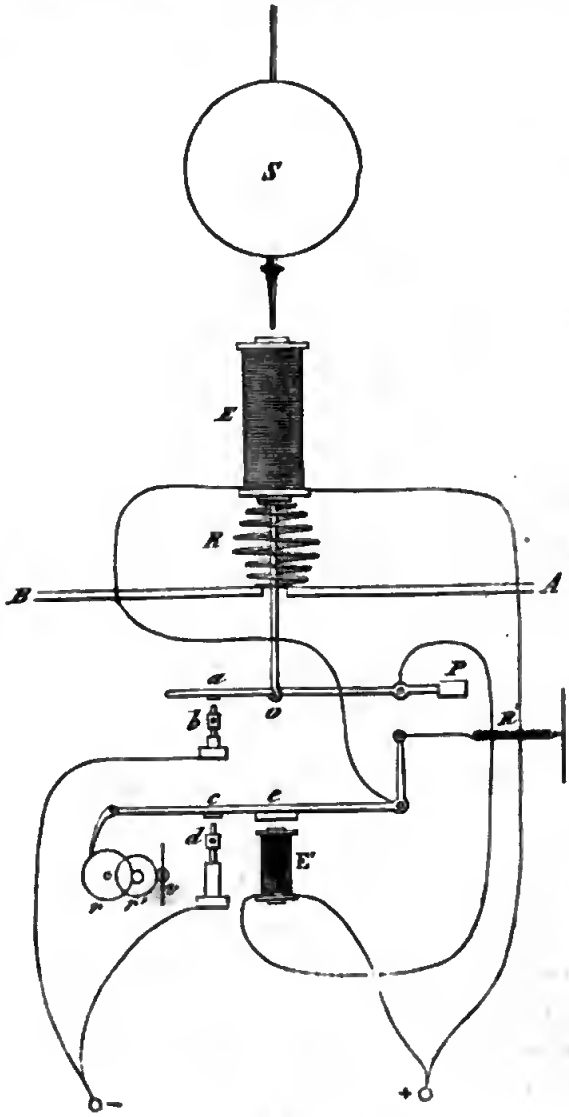


Fig. 416.

Un électro-aimant E, placé exactement sur la verticale du point de suspension du pendule repose sur un ressort R soutenu par la plaque AB. Une tige verticale, fixée à l'électro-

aimant, passe à travers le ressort et se termine par un crochet *o*, dans lequel s'engage le levier *ap*, équilibré par le poids *p*, et portant un contact *a*, qui peut venir toucher la pièce *b*, dont une vis sert à régler la hauteur. Un levier coudé, que tend à soulever le ressort R′, porte une armature *e* placée au-dessus d'un second électro-aimant E′, plus petit que E et disposé sur la même verticale; *c* et *d* constituent un contact semblable à celui du premier levier. La tige *ec* se termine par une came qui s'appuie sur les deuts d'une roue *r*, laquelle engrène avec le pignon d'une seconde roue *r′*, qui communique son mouvement à un petit volant *v*. De chacun des pôles de la pile partent deux fils, de manière à former deux circuits complets et indépendants qui constituent, l'un, l'électro-aimant supérieur, et l'autre, l'électro-aimant inférieur.

La sphère S qui se meut sous l'action de la pesanteur est en cuivre et contient un cylindre de fer doux, dont l'axe est le prolongement du fil de suspension.

Supposons le pendule à l'extrémité de sa course : le ressort R, légèrement comprimé par le poids de l'électro-aimant, permet au contact *ab* de s'établir; il en résulte que le courant passe dans E′, que l'armature *e* est attirée, le contact *cd* établi, et que, par conséquent, le courant circule dans E. Quand le fil du pendule arrive près de la verticale, le cylindre de fer doux placé dans l'intérieur de la sphère, se trouvant à proximité de l'électro-aimant, est attiré, et le pendule reçoit l'impulsion qui conserve l'amplitude de ses oscillations. Il faut remarquer que cette impulsion lui est toujours donnée dans le plan où il se meut, puisque ce plan passe toujours par la verticale du point de suspension sur laquelle se trouve aussi le centre d'action de l'électro-aimant E et celui de l'électro-aimant E′, dont la force attractive, si elle n'est pas négligeable, est du moins ainsi sans influence sur la direction du plan d'oscillation. Voici maintenant comment l'aimantation cesse du moment où le pendule a dépassé la verticale, et où par conséquent l'attraction magnétique s'opposerait à son mouvement. La figure représente l'appareil dans l'instant où la sphère se trouve au-dessus de E; celui-ci, qu'un très-faible effort suffit pour soulever à cause

de l'élasticité du ressort, est attiré verticalement par le fer doux, s'élève de quelques millimètres et soulève le levier *ap*, ce qui interrompt le contact *ab*; l'électro-aimant E′ cessant d'être aimanté, le ressort R′ soulève le levier coudé, le contact *cd* est interrompu et le courant ne peut plus circuler dans l'électro-aimant E. Mais il était important de disposer les choses de telle manière que le courant ne pût se rétablir dans E avant que la sphère ne fût en dehors de son champ magnétique. Or, dès que le pendule a dépassé la verticale l'électro-aimant retombe, et E′ de nouveau aimanté attire son armature; mais la came *f*, arrêtée par les dents de la roue *r*, ne permet au levier que de descendre d'un mouvement lent et régulier qui est réglé par le volant *v*, en sorte que le contact *cd* ne se rétablit qu'au bout d'un certain temps, lorsque la sphère du pendule est hors du champ magnétique de l'électro-aimant.

Appareil électro-trieur.

Dans la métallurgie du fer, telle qu'elle se pratique habituellement, la séparation du métal et des matières qui l'accompagnent, ou *gangue*, a lieu par voie de fusion; la fonte, plus dense, s'écoule au-dessous du laitier qui la recouvre. Un autre procédé, mis en avant par M. Chenot, consiste à séparer d'abord à l'état solide le fer ou plutôt l'oxyde de fer de sa gangue, puis à réduire ce minerai trié en employant une température très-inférieure à celle qui produit la fusion de la fonte. Par sa méthode, M. Chenot obtient le fer à l'état d'éponge métallique qui jouit de la singulière propriété de brûler comme du charbon, et qu'une forte compression transforme en fer ordinaire. M. Chenot emploie le fer obtenu sous cet état particulier dans une fabrication nouvelle et intéressante de l'acier, qui consiste à produire la cémentation du fer, en mettant en contact l'éponge métallique avec un composé liquide de carbone, du goudron par exemple, qui pénètre dans toute sa masse, et en produisant, par une brusque élévation de température, la combinaison des deux éléments. Nous indiquons ici le principe de cette méthode

métallurgique, pour faire comprendre l'application qu'y trouve l'électro-magnétisme. En effet, on sépare le minerai de sa gangue en se servant de ses propriétés magnétiques que l'on développe, si le fer y est à l'état de peroxyde, en le mettant en contact avec de la vapeur d'eau, ce qui le fait passer à l'état d'oxyde magnétique.

On doit à M. Froment un appareil électro-trieur, qui, par ses proportions, la rapidité avec laquelle il fonctionne et la quantité de matière sur laquelle il peut agir, prend le rang d'une machine industrielle. Il est représenté de profil dans la figure 417. Un cercle de fonte, dont le diamètre est d'un mètre

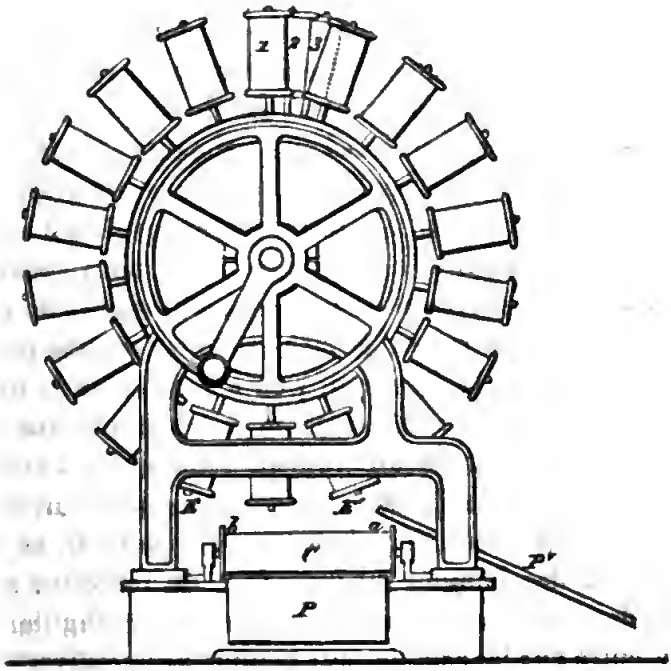


Fig. 417.

environ, tournant autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan de la figure, porte à sa circonférence 18 électro-aimants dont les axes sont dirigés suivant le prolongement des rayons du cercle. Au-dessous, une toile sans fin passe sur le cylindre *c* et sur un second cylindre exactement pareil placé en arrière du

premier, de telle sorte que la nappe supérieure de cette toile, dont la projection est *ab*, se meut dans un plan horizontal perpendiculairement à celui de la figure, lorsque les cylindres qui la conduisent reçoivent un mouvement de rotation. Le minerai de fer, réduit et pulvérisé, est étendu continuellement sur l'une des extrémités de la toile; entraîné avec elle, il vient passer sous les électro-aimants en mouvement.

Un commutateur, qui n'est pas représenté sur la figure, est disposé de manière à ne faire passer le courant de la pile qui fonctionne, que dans les bobines qui occupent à un instant quelconque l'arc le plus bas de la circonférence, de sorte que chaque fer doux, en arrivant en E s'aimante, reste aimanté de E en E′, puis perd de nouveau ses propriétés magnétiques. Par cette disposition et par les mouvements combinés de la roue et de la toile, tout le fer que contient le minerai est attiré à mesure qu'il arrive, reste adhérent au fer doux qui l'a soulevé et ne retombe que lorsque celui-ci se désaimante, de façon qu'il est reçu sur le plan incliné P′, et se trouve ainsi séparé des matières soit métalliques, soit terreuses, auxquelles il était mélangé; celles-ci, entraînées toujours par le mouvement de la toile, viennent se déverser sur le plan incliné figuré en P.

Au lieu d'un seul rang d'électro-aimants, comme nous l'avons supposé dans la figure, il y en a trois dans la machine électro-trieuse de M. Froment. Qu'on se représente trois cercles garnis d'électro-aimants absolument semblables à celui que nous avons décrit, placés les uns derrière les autres sur le même axe, mais non pas tout à fait dans la même position, en ce sens que les axes des bobines du second et du troisième sont répartis à des distances égales, dans l'intervalle angulaire que laissent entre eux les axes de deux bobines consécutives du premier, arrangement représenté en lignes ponctuées pour les électro-aimants marqués des numéros 1, 2 et 3. Le commutateur fonctionne à la fois pour les trois rangs de bobines. Par cette disposition, il n'est aucune partie du minerai qui puisse échapper à l'action magnétique, et l'opération a lieu, pour ainsi dire, d'une manière continue.

Les fers doux n'ont pas une forme cylindrique; leur section

est très-allongée perpendiculairement au plan de la figure, c'est-à-dire dans le sens suivant lequel s'avance le minerai. On communique le mouvement à l'appareil, soit à l'aide de la manivelle H, soit au moyen d'une courroie sans fin, passant sur l'arbre d'une machine à vapeur et sur la poulie en fonte K, qui, sur la figure, cache en partie le cercle auquel sont adaptés les électro-aimants. Nous n'avons pas représenté le mécanisme qui transmet ce mouvement aux cylindres portant la toile sans fin, dont la vitesse de rotation doit être réglée suivant la richesse en fer du minerai, et qui donne un mouvement de va et vient à l'entonnoir qui contient la matière pulvérisée, de façon à la déverser d'une manière régulière et continue sur la toile mobile.

Application de l'électro-magnétisme à l'adhérence des locomotives sur les rails, à la transmission du mouvement et à l'enrayage des convois.

On sait qu'un chemin de fer ne doit présenter que des pentes à peine sensibles, et que si l'inclinaison des rails dépassait une limite insuffisante dans la plupart des cas pour éviter de grands travaux, les roues des locomotives patineraient, c'est-à-dire tourneraient sur elles-mêmes sans avancer, parce que le frottement développé aux points de contact des roues et des rails ne pourrait plus faire équilibre aux résistances du train. — En augmentant le poids de la locomotive, on augmente, il est vrai, la valeur limite du frottement, qui est proportionnelle à la pression normale, mais la résistance devient aussi plus grande, et la difficulté consiste précisément à séparer ces deux éléments l'un de l'autre, c'est-à-dire à trouver le moyen d'augmenter uniquement la pression normale à la direction des rails. — Une attraction électro-magnétique se présentait naturellement comme la solution du problème, et cette idée fut émise en particulier par M. Weber et M. Liebig. M. Nicklès est le premier qui se soit sérieusement occupé de cette question; et, bien que ses travaux sur ce sujet n'aient pas encore amené de résultats

pratiques, on lui doit du moins des essais utiles et des données précises[1].

Un procédé très-simple consistait à lier à la locomotive des électro-aimants qui fussent le plus près possible des rails, de manière à agir sur eux avec une grande puissance; l'expérience faite en petit réussit fort bien, mais on ne pnt espérer un résultat pratique à cause du pouvoir magnétique énorme qu'il eût fallu obtenir pour cela. — M. Nicklès eut alors l'idée d'aimanter les roues motrices, en enveloppant chacune d'elles, près de son point de contact avec le rail, d'une hélice dont la paroi intérieure embrasse la jante sans la toucher. La figure 418 représente la roue d'un appareil d'essai qui fonctionne avec succès, et c'est à la suite de ces premières expériences que M. Nicklès fit l'application de son procédé à une locomotive qui fut mise à sa disposition sur le chemin de fer de Lyon. La pile, composée de 64 éléments Bunsen, était placée dans le tender, et chacune des deux hélices qui entouraient le bas des roues motrices était formée d'un fil de 518 mètres de longueur formant 216 tours et de 4^{mm},5 de diamètre. Le poids de la locomotive était de 29 tonnes, celui du convoi entier de 119 tonnes; on fit l'essai sur une pente de 10 millimètres par mètre et on put constater que l'aimantation des roues produisait une augmentation d'adhérence d'environ 8 pour 100, lorsque la locomotive marchait à petite vitesse. Ces expériences montrèrent aussi que l'adhérence électro-magnétique décroît assez rapidement lorsque la vitesse augmente, ce qui est dû, suivant M. Nicklès, aux deux causes suivantes :

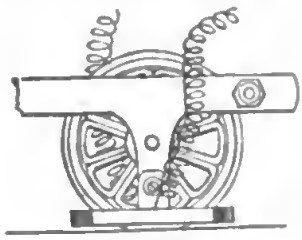


Fig. 418.

1° Le déplacement du pôle magnétique, qui, lorsque la roue est en repos, se trouve à son point de contact avec les rails, mais qui se déplace pendant le mouvement, et se transporte en arrière.

[1] Thèse de physique présentée par M. Nicklès à la Faculté des sciences de Paris. — *Archives des Sciences physiques et naturelles.*

2° La force coercitive de la fonte, dont se compose la roue, qui diminue l'intensité du magnétisme, parce qu'une portion quelconque de la jante passe continuellement et avec plus ou moins de rapidité d'une polarité à l'autre. Enfin, comme M. Nicklès l'observe lui-même, on peut reprocher à son procédé de n'utiliser qu'un des deux pôles magnétiques développés dans chaque roue.

Ce sont ces considérations qui ont amené M. Nicklès à abandonner le mode d'aimantation qu'il avait d'abord adopté, et à le remplacer par ce qu'il appelle les électro-aimants circulaires. Un barreau de fer doux, enveloppé d'une hélice à l'intérieur de laquelle il peut tourner, et terminé à ses deux extrémités par des disques également de fer doux, à la circonférence desquels le magnétisme a son maximum d'intensité, constitue un électro-aimant circulaire (fig. 419). D'après les expériences de M. Nicklès, la meilleure manière d'utiliser le pouvoir aimantant d'un courant est de produire au milieu de l'électro-aimant un point conséquent en y changeant le sens de l'hélice, et en y fixant

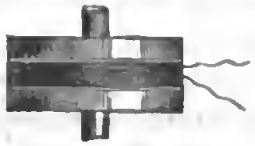


Fig. 419.

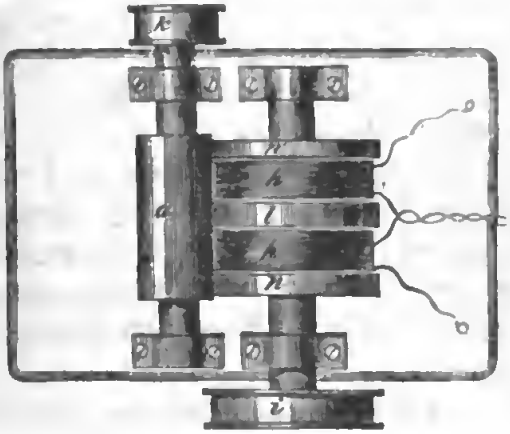


Fig. 420.

un cercle en fer doux pareil aux deux autres. — Cette disposition est réalisée dans l'appareil (fig. 420), où l'adhérence électro-magnétique sert à transmettre le mouvement de la poulie *i* à la poulie *k*. Les hélices *h* et *h'* sont enroulées en

sens contraire l'une de l'autre, en sorte que *n* et *n'* sont des pôles nord et *l* un pôle sud; *a* est un cylindre en fer contre lequel adhèrent les trois cercles polaires de l'électro-aimant circulaire. On conçoit que dans cette disposition le mouvement ne doit en rien changer les conditions du magnétisme; et, en partant des données que lui ont fournies les appareils analogues à celui que nous venons de décrire, M. Nicklès pense qu'une roue motrice de locomotive pourra donner, dans des conditions d'aimantation faciles à réaliser, une attraction de 2 ½ tonnes par ligne de circonférence; or, dans les expériences citées plus haut, 250 kilog. d'attraction par roue ont fourni une augmentation d'adhérence de 8 pour 100; on arriverait donc, en appliquant aux locomotives le procédé des électro-aimants circulaires, à un accroissement d'adhérence de 91 pour 100, et cette adhérence serait sensiblement constante pour toutes les vitesses.

Nous dirons ici quelques mots d'une autre application de l'électro-magnétisme aux chemins de fer, qui permet, en faisant passer un courant le long d'un train, de mettre instantanément tous les freins en action dès que le mécanicien veut arrêter le convoi. L'*enrayeur électrique* de M. Achard est, de tous les appareils qui ont été inventés dans ce but, le plus satisfaisant. — Le serre-frein est mis en mouvement par le fait même de la marche du convoi, du moment où une roue dentée que porte son arbre est poussée de côté par un cliquet. Or ce cliquet ne devient libre d'agir que lorsqu'une pièce de fer doux qui le tient en respect est attirée par un électro-aimant. Ainsi, du moment où le mécanicien ferme le circuit qui passe par tous les électro-aimants, les serre-freins commencent à agir, et arrêtent au bout de quelques instants la marche du convoi.

Enregistreurs électriques.

Nous avons déjà signalé, dans le paragraphe des télégraphes électriques, l'utilité qu'on avait tirée de ce mode de communication pour différentes observations scientifiques, plus particulièrement astronomiques; nous avons également décrit dans le paragraphe actuel bien des instruments et des appareils im-

portants fondés sur les mêmes principes. Il nous reste à ajouter quelques détails sur l'application qu'on en a faite à l'enregistrement de certaines observations.

Wheatstone, qu'on retrouve toujours quand il s'agit des questions de ce genre, avait imaginé un système d'appareils qui, susceptibles de s'élever dans l'atmosphère au moyen d'un ballon captif, pouvaient donner, à différentes hauteurs, la température, la pression de l'air, l'humidité, l'intensité et la direction du vent, etc. Voici comment est construit le thermomètre : Le mouvement d'une petite horloge fait descendre et monter régulièrement, en six minutes, un engrenage vertical; cet engrenage porte un fil fin de platine qui se ment dans le tube du thermomètre et dont les excursions ont une étendue qui correspond à un nombre plus ou moins grand des divisions de l'échelle thermométrique. Deux fils fins de cuivre, recouverts de soie, et d'une longueur suffisante pour unir le ballon à la terre dans sa plus grande élévation, sont fixés à l'instrument, de manière que l'extrémité de l'un plonge dans le mercure du thermomètre et que l'extrémité de l'autre soit en contact avec la roue de l'horloge, laquelle communique métalliquement avec le fil de platine. Les extrémités inférieures des deux fils qui arrivent au sol sont unies par un galvanomètre et par une très-petite pile à un seul couple. Le galvanomètre reste à 0° tant que le fil de platine n'est pas en contact avec le mercure du tube; mais l'aiguille dévie aussitôt que le contact a lieu et reste déviée jusqu'à ce que le contact soit de nouveau rompu par l'ascension de l'engrenage qui porte le fil. Le temps employé par le fil de platine à parcourir l'échelle de haut en bas étant de trois minutes, le fil parcourt la 360° partie de cette échelle pendant la demi-seconde de temps correspondant aux battements de l'horloge, et par conséquent chaque point de l'échelle correspond à un battement différent ou à une demi-seconde différente prise dans la série des trois minutes. Dès lors, si un observateur muni à terre d'un chronomètre réglé de manière à suivre dans ses indications l'horloge emportée dans l'espace par le ballon, note l'instant précis auquel l'aiguille du galvanomètre a été déviée, il déduira immédiatement de cette observa-

tion la température indiquée par le thermomètre du ballon; car, suivant le degré différent de hauteur auquel sera la colonne de mercure, le contact du fil de platine avec le mercure, et par conséquent le courant s'établira à une certaine demi-seconde ou à une autre. Si les indications des deux chronomètres ne se correspondaient pas à la fin d'une série d'observations, les résultats ne seraient pas néanmoins défectueux; il suffirait de leur faire subir une correction facile à trouver.

On peut ajouter à l'appareil un thermomètre à boule toujours mouillée, soit un psychromètre, un baromètre, un anémomètre, etc., addition qui exige simplement qu'on munisse l'engrenage de plusieurs fils de platine, et qu'un même nombre de fils de cuivre recouverts de soie partent du ballon pour venir jusqu'à terre servir à y former un circuit dont doivent faire partie, comme pour le précédent, un galvanomètre et un couple voltaïque.

Les indications des instruments météorologiques peuvent être transmises à distance par l'action d'un électro-aimant qui fait sonner une cloche ou qui imprime un caractère; mais quand il s'agit d'expériences à faire avec les ballons captifs, il vaut mieux employer les déviations d'un galvanomètre, parce qu'elles n'exigent pas un courant aussi fort et qu'on peut se servir de fils conducteurs beaucoup plus fins et par conséquent beaucoup moins pesants.

En résumé, au moyen du procédé imaginé par Wheatstone, on peut observer, de six en six minutes, toutes les variations de pression, de température, d'humidité, etc., qui se produisent à une grande hauteur dans l'espace; on pourrait également par ce moyen déterminer à chaque instant la température et le volume des eaux d'un puits artésien, même le plus profond.

C'est également en faisant mouvoir, au moyen d'une horloge bien réglée, un cylindre recouvert de papier, auquel un style, mû par un électro-aimant dont l'aimantation est déterminée par le pendule d'un chronomètre, imprime des points équidistants, que M. Airy est parvenu à enregistrer d'une manière fort commode et fort précise les observations faites avec la lu-

nette méridienne, ainsi que nous l'avons déjà remarqué à la fin du paragraphe précédent. En effet, si le pendule du chronomètre bat la seconde, les intervalles compris entre les marques successives du style correspondent à une seconde en temps, et lorsqu'au moment du passage d'une étoile devant le fil de la lunette, on appuie le doigt sur la clef d'un commutateur, on ferme le circuit d'un autre courant, on détermine le mouvement d'un second style qui imprime sur le papier du cylindre un point dont la place est facile à déterminer par rapport aux points équidistants marqués par le premier style. Cet intervalle est traduit en temps, et on a ainsi le résultat désiré avec une grande précision et d'une manière fort commode. M. Airy a également employé les propriétés magnétiques du courant électrique à faire marcher d'une manière parfaitement uniforme toutes les horloges de son observatoire, en se servant pour cela de procédés analogues à ceux que nous avons décrits plus haut.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans mentionner encore l'heureuse application que M. Palmieri a faite des propriétés des électro-aimants à la construction d'un appareil destiné à enregistrer les secousses de tremblement de terre, et qu'il a désigné sous le nom de *seismographe électro-magnétique*. Ce genre d'appareils n'est pas nouveau; car depuis quelques années plusieurs physiciens, en particulier M. Mallet en Angleterre, se sont occupés de chercher les moyens d'obtenir le résultat qui a été le but des efforts de M. Palmieri; c'est en général au moyen du déplacement rendu appréciable d'une certaine masse de mercure, qu'on a réussi à constater les tremblements de terre et à en apprécier, autant que possible, l'intensité et la direction. M. Palmieri a été conduit à s'occuper de ce sujet par la fréquence des secousses de petits tremblements de terre qu'il a pu observer à l'Observatoire royal du Vésuve; ces tremblements locaux, qui quelquefois se font sentir jusque dans les villages voisins, se distinguent de ceux qui ébranlent une région étendue, et dont le centre est situé autre part, en ce qu'ils sont petits et de courte durée, et que leur force diminue rapidement avec la distance du volcan où ils prennent naissance. Beaucoup de ces commotions pas-

sent inaperçues, et cependant il y a un intérêt à les enregistrer exactement en indiquant le temps précis auquel elles commencent; mais M. Palmieri n'a pu trouver, parmi les seismomètres connus, aucun qui répondît parfaitement à son but, c'est-à-dire qui enregistrât par lui-même les plus petites secousses, en indiquant le moment auquel elles ont lieu et en faisant connaître si elles sont ou verticales ou ondulatoires, soit horizontales. L'appareil nouveau remplit bien ce but; il se compose au fond de deux appareils distincts, l'un pour les tremblements de terre verticaux, l'autre pour les ondulatoires, soit horizontaux.

Pour se faire une idée exacte du premier appareil, celui destiné aux tremblements de terre verticaux, il faut se représenter une hélice de fil de laiton suspendue à l'extrémité d'un ressort et portant à sa partie inférieure un cône de cuivre ou de platine, situé à une très-petite distance au-dessus d'une surface de mercure placé dans une petite cuvette en fer; il est évident que, s'il survient un tremblement de terre vertical, l'extrémité du cône métallique arrivera en contact avec le mercure par l'effet de l'élasticité du ressort et de l'hélice. Si, d'un autre côté, l'hélice et le mercure sont en communication réciproquement avec les deux pôles d'une pile voltaïque, le courant pourra être transmis à l'instant où commence le tremblement de terre. En introduisant dans le circuit un électro-aimant dont l'armure est fixée à un bras de levier, on conçoit qu'on peut à ce même instant arrêter une horloge faisant partie de l'appareil et indiquant le jour du mois, l'heure, la minute et la seconde, et faire également sonner un timbre. L'addition du timbre présente, outre l'avantage de donner l'avertissement, celui que, si l'horloge était arrêtée par quelque cause accidentelle sans que le timbre eût été mis en mouvement, on ne puisse pas attribuer à un tremblement de terre l'arrêt de l'horloge. On aurait pu, au lieu de se servir d'une horloge en mouvement qui s'arrête, en employer une en repos que le tremblement de terre aurait mise en mouvement; M. Palmieri estime le premier moyen préférable quand il s'agit d'indiquer le commencement du tremblement de

terre; il compte se servir du second pour obtenir l'indication du retour en sens contraire.

Le second appareil, celui destiné à enregistrer les tremblements de terre ondulatoires, se compose de quatre tubes de verre recourbés en forme de U et contenant du mercure; l'un d'eux est dirigé du sud au nord, un autre de l'est à l'ouest; les deux autres ont des directions intermédiaires; il est évident qu'une secousse ondulatoire fera osciller un peu le mercure dans un ou deux de ces tubes; par conséquent si on a fait plonger dans l'une des branches de chacun des quatre tubes un fil de fer, et que dans l'autre on ait disposé un fil de platine qui soit à une très-petite distance de la surface du mercure sans la toucher, le mercure, en oscillant au moment de la secousse, viendra en contact avec le platine, et un courant électrique, trouvant son circuit fermé, arrêtera une horloge et fera sonner un timbre. On pourra même, par l'arrêt de l'horloge, reconnaître que le tremblement de terre était ondulatoire et déterminer en même temps quelle était la direction approximative de l'oscillation; en effet, chaque tube porte un mécanisme semblable à celui du baromètre à cadran, avec la seule différence que le contre-poids étant un peu plus pesant que le flotteur, l'index, une fois déplacé, ne revient pas au zéro de la graduation. Le déplacement de l'index indique donc quel est celui ou quels sont ceux des quatre tubes qui ont éprouvé un mouvement oscillatoire, et, comme ce déplacement est permanent, leur amplitude permet jusqu'à un certain point de mesurer celle de l'oscillation. On peut rendre très-petite la distance entre la surface du mercure et l'extrémité de l'hélice et des fils de platine, pourvu qu'on ait un système de compensation qui permette à la distance d'être constante malgré les variations de température; de cette manière, l'appareil acquiert une grande sensibilité et peut accuser les secousses les plus légères.

Nous n'avons pas mentionné, dans le paragraphe des sonnettes électriques, un système télégraphique inventé, il y a quelques années, par M. Walker, et qui fonctionne avec succès sur le chemin de fer anglais de South-Eastern. L'appareil qui

sert à donner les signaux se compose simplement d'un timbre et d'un marteau dont le levier est relié à l'armure d'un électro-aimant, de telle sorte que le marteau frappe un coup lorsque le courant s'établit dans l'électro-aimant. Considérons deux stations A et B, dans chacune desquelles est un de ces appareils accompagné d'une pile; le tout fait partie d'un même circuit, et le conducteur communique de part et d'autre avec le sol. Dans l'état ordinaire, les piles ayant leurs pôles dirigés en sens inverse dans le circuit et étant réglées de manière que le courant total soit nul, les électro-aimants ne sont pas aimantés. Si l'on veut transmettre un signal de A à B, un commutateur, disposé sur l'appareil timbre, fait sortir la pile A du circuit et donne au conducteur une nouvelle voie de communication avec le sol; le courant de la pile B s'établit et l'appareil B frappe un coup. L'appareil A peut agir ou non en même temps que B, suivant que le commutateur agit devant ou derrière l'électro-aimant. Quant aux communications entre un train et les deux stations voisines, elles s'établissent au moyen d'un conducteur que porte le train, et que l'on met en contact un certain nombre de fois avec le même fil télégraphique dont nous venons d'indiquer la disposition. Comme ce conducteur communique avec le rail et de là avec le sol, du moment où l'on établit le contact, le courant s'établit soit en A, soit en B, et les deux appareils fonctionnent.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Boussingault. — *De la Rive.* — *Grove.* — Éclairage des mines par la lumière électrique. — *Arch. de l'élect.* T. v, p. 540.

Roberts. — Chaleur électrique employée à faire sauter les rocs. — *Arch. de l'élect.* T. II, p. 646.

Verdu. — *Idem.* — *Comptes rendus de l'Acad. des Sc.* T. XXXVIII, p. 801 et 1024.

Dumoncel. — *Idem.* — *Comptes rendus de l'Acad. des Sc.* T. XXXIX, p. 649.

Müller. — Lois des électro-aimants. — *Annales de ch. et de phys.*, septembre 1856.

Jacobi. — Machine électro-motrice. — *Arch. de l'élect.* T. III, p. 233, et t. v, p. 569. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXXIV.

Joule et Scoresby. — Électro-magnétisme considéré comme force motrice. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. III, p. 34.

Petrie. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 140.

Page. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVI, p. 55.

Hunt. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XIV., p. 312.

Steinheil. — Télégraphie électrique. *Annales de ch. et de phys.* T. LXXI (1839), p. 347.

Morse. — *Idem.* — *Annales de ch. et de phys.* T. LXVII (1839), p. 219.

Seemens. — *Idem.* — *Annales de ch. et de phys.* T. XXIX (N. S.), p. 385.

Wheatstone. — Télégraphes et autres appareils électriques. — *Arch. de l'élect.* T. III, p. 348, et t. IV, p. 170.

Moigno. — *Traité de télégraphie électrique.* — Paris, 1852.

Shellen. — *Der electromagartisch telegraph.* — Brunswick, 1850.

Vail. — *Télégraphe électro-magnétique américain.* (Traduit par Vattemare). — Paris, 1857.

Gloesener. — *Recherches sur la télégraphie électrique.* — Liége, 1853.

Steinheil. — *Instruction pour les télégraphistes suisses.* — Berne 1852.

Regnard. — *Mémoire sur la télégraphie électrique*, etc. — Paris, 1855.

Walker. — *Électro-télégraphe manipulateur.* — London, 1850.

Lardner. — *The electro-telegraph.* — London, 1855.

Airy. — Détermination des longitudes par la télégraphie électrique. — *Société royale astronomique de Londres.* T. XXIV, *et Annuaire de l'Observatoire de Bruxelles pour* 1856.

Leverrier. — *Idem.* — *Comptes rendus de l'Acad. des Sc.* T. XLIII, p. 249.

Wartmann. — Transmission simultanée de dépêches électriques. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXXI, p. 103.

Hipp. — Télégraphe militaire portatif. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXXIII, p. 109.

Becquerel père et fils. — *Traité d'électricité et de magnétisme*, 3 vol. — Paris, 1855-1856.

Dumoncel. — *Exposé des applications de l'électricité*, 3 vol. — Paris, 1857.

CHAPITRE II.

APPLICATIONS CHIMIQUES.

§ I. Considérations générales sur les forces électro-chimiques et leurs applications.

Nous avons exposé, dans le chapitre troisième de la cinquième partie de ce traité, les rapports intimes qui existent entre les forces électriques et les forces chimiques; nous avons insisté, en particulier, dans la théorie du couple voltaïque, sur la manière dont l'exercice de l'affinité peut être facilité par des dispositions qui permettent la circulation de l'électricité dont elle est toujours accompagnée. Nous avons également étudié en détail, dans le chapitre troisième de la quatrième partie, la puissance décomposante de l'électricité dynamique et la manière de l'opposer à la force de l'affinité. Il est facile de concevoir, après ce double examen, l'importance du rôle que peut jouer l'emploi judicieux de l'électricité dans les arts chimiques qui tous sont fondés sur l'effet et la lutte des affinités. Déjà, bien longtemps avant qu'on eût découvert la liaison qui existe entre les actions électriques et les actions chimiques, on faisait concourir, sans s'en douter, dans plusieurs des arts chimiques, l'électricité elle-même à la production de certains effets, comme, par exemple, dans l'étamage des épingles. On avait bien soupçonné, peu après la découverte des actions voltaïques, que l'électricité jouait un rôle dans certains phénomènes attribués jusqu'alors exclusivement à l'affinité chimique, tels que la précipitation des métaux de leur dissolution, par l'immersion d'un autre métal dans la dissolution; par exemple, par l'immersion dans une dissolution de sulfate de cuivre, d'une lame de fer qui se recouvre promptement de cuivre métallique.

Mais on n'avait sur ces sujets que des idées confuses, à cause de l'absence de notions justes sur les rapports qui lient les deux genres de force.

Grotthus avait le premier bien compris, dans son travail sur l'influence de l'électricité galvanique sur les végétations métalliques, le rôle de cette électricité dans ces phénomènes; il avait remarqué, en effet, que quand la végétation métallique a commencé, le métal en dissolution ne peut continuer à se déposer sur les extrémités de la végétation qu'autant que celle-ci communique par l'un de ses points avec le métal qui sert de précipitant, ce qui forme un véritable couple voltaïque. Il avait également observé que deux métaux, incapables d'opérer séparément la précipitation d'un métal tenu en dissolution, peuvent l'opérer quand ils sont mis en contact de manière à constituer un couple voltaïque. Voici une jolie expérience de Grotthus, à l'appui de ses conclusions : Après avoir rempli jusqu'à la moitié de sa hauteur un tube de 16 centimètres de hauteur et de 7 à 8 millimètres de diamètre, d'une solution concentrée de nitrate de cuivre, il fit couler au-dessus légèrement une dissolution un peu alcoolique, et par conséquent peu dense, de nitrate d'argent pur et parfaitement neutre, de façon que les deux liquides fusseut parfaitement en contact sans cependant se mélanger. Un petit cylindre de cuivre fut plongé dans le nitrate d'argent sans être en contact avec celui de cuivre qu'il ne précipite pas ; il ne tarda pas à précipiter l'argent, sous forme de guirlandes très-fines, en chaînes argentines finissant par s'approcher peu à peu de la dissolution bleue de cuivre, et, quand elles l'eurent atteinte, elles se couvrirent bientôt de particules de cuivre dont la couleur était parfaitement distincte et ne permettait point de les confondre avec celle de l'argent. En remplaçant le cylindre de cuivre par un cylindre de zinc, la précipitation du cuivre, aux extrémités des rameaux de l'argent, est beaucoup plus prompte ; il est vrai que le zinc précipiterait le cuivre du nitrate de cuivre, s'il y plongeait directement.

Bucholz avait montré le premier que les métaux peuvent former avec leurs propres dissolutions et l'eau, soit pure, soit

acide ou salée, des circuits électriques dont l'action précipite le métal; ainsi, par exemple, en mettant dans une éprouvette une dissolution métallique de cuivre aussi neutre que possible, telle que du sulfate de cuivre, et versant dessus avec précaution de l'eau pure ou de l'eau acidulée, de manière que les liqueurs restent séparées, si l'on vient à plonger lentement dans l'éprouvette une lame de cuivre, quelques heures après le bout de la lame qui est en contact avec la dissolution métallique se recouvre d'un précipité de cuivre. L'effet électro-chimique provient de la réaction chimique de l'eau sur la partie du métal qui y plonge, réaction qui donne naissance à un courant, à la production duquel contribue aussi la réaction chimique des deux liquides l'un sur l'autre. Mais ce genre d'action est moins général que Bucholz ne l'avait cru; car il y a des métaux, tels que le zinc, le fer et l'étain, qui, avec une dissolution de leurs sulfates respectifs et l'eau, donnent des effets électriques contraires, les dissolutions attaquant plus fortement le métal que l'eau ne les attaque, de sorte que le métal se dépose sur le bout qui plonge dans l'eau. Ainsi lorsqu'on emploie une dissolution concentrée de proto-chlorure d'étain mise au fond de l'éprouvette, et que le liquide supérieur est de l'eau ou une dissolution très-étendue de proto-chlorure, la lame d'étain, plongeant à la fois sous les deux couches liquides, le dépôt métallique s'opère, sous la forme d'aiguilles rayonnantes, sur la partie supérieure de la lame; ce dépôt commence à la surface de séparation des deux couches liquides, et, au bout de plusieurs jours, on a un dépôt métallique abondant. On peut même avec le cuivre avoir un effet semblable et, par conséquent, contraire à celui qu'on obtient ordinairement; il suffit, pour cela, de plonger une lame de cuivre dans une éprouvette, dont le liquide inférieur est du proto-chlorure acide de cuivre et le liquide supérieur de l'eau ordinaire, qui attaque moins le cuivre que le proto-chlorure acide. M. Becquerel a fait souvent usage, pour obtenir soit des métaux revivifiés, soit des composés métalliques (oxydes et sels de différente nature), d'appareils fondés sur le principe des expériences de Bucholz.

Le travail le plus complet qui ait été fait sur la réduction

des métaux par voie humide est, sans contredit, celui de Fischer, de Breslaw. Quoique ce chimiste n'ait vu, dans ces phénomènes, que de simples effets de l'affinité chimique, et ait trop négligé l'influence sur leur production des forces électriques mises en jeu, le nombre excessivement considérable de faits bien observés qu'il a décrits donne un grand prix à ses recherches qui, étudiées de près, peuvent contribuer utilement à établir les relations existantes entre l'affinité et l'électricité. Les expériences ont été faites en donnant aux métaux réducteurs la forme de fils, de tiges ou de lames, sauf pour quelques-uns, tels que le cobalt, l'urane et le manganèse qu'on a été obligé d'employer à l'état de culots ou de globules; on opérait, en général, dans des vases ouverts et de façon que la partie supérieure du métal réducteur pût sortir du liquide, sauf dans quelques cas où le métal réducteur était plongé en entier dans le liquide et le vase hermétiquement clos.

Les expériences ont porté sur dix-huit métaux différents; chacun a été essayé successivement comme réducteur dans les dissolutions de divers sels formés par les autres, et elles ont conduit à les grouper en quatre classes ou séries, savoir : 1° métaux réductibles; 2° métaux réducteurs; 3° métaux qui ne peuvent pas être réduits (métaux non réductibles); 4° métaux qui ne peuvent pas réduire (métaux non réducteurs).

Si l'on classe les métaux réductibles d'après la force et la facilité avec laquelle ils sont réduits, on trouve l'ordre suivant : or, argent, osmium, palladium, iridium, platine, rhodium, mercure, tellure, cuivre, antimoine, bismuth, arsenic, plomb, étain, nickel, cadmium et fer. Cet ordre est un peu différent, si on les groupe en suivant un ordre relatif au nombre des métaux par lesquels chacun d'eux est réduit, de telle sorte que le métal réduit par le plus grand nombre d'autres métaux soit à la tête, et le métal réduit par le moins grand nombre à la fin de la série. Ainsi, dans cette seconde série, l'argent doit être placé après les métaux du platine, tandis qu'il est placé avant dans la première; il en est de même pour le cuivre, par rapport à l'antimoine, au bismuth et à l'arsenic.

Les métaux réducteurs, classés d'après le nombre des mé-

taux qu'ils réduisent, se trouvent occuper l'ordre suivant : zinc, cadmium, fer, étain, plomb, cobalt, bismuth, cuivre, manganèse, arsenic, antimoine, nickel, urane, mercure, tellure, argent, palladium; le plomb et l'étain doivent occuper la même place, car ils réduisent le même nombre de métaux et se réduisent l'un l'autre.

Les métaux irréductibles sont ceux qui forment les acides, sauf l'arsenic, ainsi que l'urane, le cobalt, le manganèse et le zinc. Les métaux non réducteurs sont également ceux qui forment les acides, sauf aussi l'arsenic, ainsi que l'or, le platine, l'osmium, l'iridium et le rhodium. Enfin les seuls métaux qui soient réductibles par des substances non métalliques, sont l'or, l'argent, l'osmium, le platine, le palladium, le tellure, le mercure et le cuivre. Parmi les substances non métalliques, le phosphore est celle qui réduit le plus grand nombre de métaux.

Fischer, comme nous l'avons dit, attribue le plus grand nombre des faits du genre de ceux dont nous venons de parler à la simple affinité chimique, sans l'intervention des forces électriques; il cite à l'appui de son opinion plusieurs observations remarquables; toutefois, il nous paraît évident que, si l'affinité chimique est la cause première de la précipitation d'un métal sur un autre, le courant électrique qui accompagne cette précipitation tend à son tour à l'augmenter, et par conséquent concourt à sa production. Il est évident que, dans les cas où le corps qui détermine la précipitation n'est pas conducteur, tel que le phosphore, l'effet n'est dû qu'à la simple action de l'affinité; mais aussi, dans ce cas, il est beaucoup plus limité. Remarquons, du reste, que tous les phénomènes dont il s'agit sont une conséquence naturelle de la manière dont nous avons envisagé la production de l'électricité voltaïque et de la théorie que nous avons donnée de ce qui se passe dans un couple. Seulement ici il faut que la substance positive soit capable de décomposer par elle-même la solution métallique dans laquelle elle est plongée, tandis que, dans un couple, son action est facilitée par son contact avec la substance négative; mais, une fois que la décomposition a com-

mencé, le dépôt d'une portion, quelque petite qu'elle soit, du métal revivifié, suffit pour produire ce couple et accélérer la décomposition. Remarquons encore qu'il arrive souvent qu'il y a couple sans qu'on s'en doute. Ainsi, quand on plonge un morceau de fer ordinaire dans une dissolution de sulfate de cuivre, l'hétérogénéité de la surface du fer constitue des couples, et le dépôt du cuivre a lieu sur les portions de cette surface où se trouvent des molécules hétérogènes. Si l'on se servait de fer parfaitement pur, cette hétérogénéité n'existant plus, il n'y aurait plus de couple et le sulfate ne serait plus décomposé. Il se passe ici exactement ce qui a lieu pour la décomposition de l'eau acidulée avec le zinc du commerce et avec le zinc distillé.

Comme les phénomènes dont il s'agit jouent un grand rôle dans les applications électro-chimiques de l'électricité, et notamment dans la galvanoplastie, nous citerons encore quelques observations importantes de Fischer, qui nous serviront plus loin.

Parmi les circonstances générales qui influent sur la facilité de la réduction, Fischer cite, outre l'affinité du métal réducteur pour l'oxygène de l'oxyde de la dissolution et celle de l'oxyde formé pour l'acide de la dissolution, l'affinité réciproque du métal réducteur et du métal réduit; cette affinité, suivant qu'elle est forte ou faible, qu'elle produit un alliage ou une simple union mécanique entre les deux métaux, peut favoriser la réduction ou lui être nuisible. La nature de la surface du métal réducteur, sa densité et sa consistance influent encore sur la réduction; une surface couverte d'aspérités la favorise; le cobalt en poudre, tel qu'on l'obtient par l'action de l'hydrogène sur son oxyde, réduit les sels sur lesquels il est sans action à l'état de culot, c'est-à-dire après avoir été fondu. La forme que prend le métal réduit exerce une grande influence en ce sens que, si celui-ci, au lieu de former une végétation cristalline, comme l'argent, le plomb, ou de se précipiter à l'état de poudre, comme le bismuth, se dépose à l'état d'une couche qui recouvre le métal réducteur, il en résulte que ce dernier, n'ayant plus de point de contact avec le

liquide, cesse d'opérer la réduction. Le degré d'impureté plus ou moins grand de la dissolution peut, suivant la nature des substances étrangères qui s'y trouvent, provoquer la réduction qui n'aurait pas eu lieu sans leur présence, ou l'empêcher quand elle aurait eu lieu sans elle; ainsi la présence des alcalis empêche presque toujours la réduction quand l'oxyde du métal réducteur ne peut pas être dissout par eux. Mais de toutes les circonstances, la plus importante est le degré de pureté du métal réducteur, à tel point que le fer n'est réducteur dans la plupart des cas, comme nous l'avons déjà remarqué, que parce qu'il n'est jamais pur, et qu'il contient des métaux, tels que de l'aluminium, du silicium, etc., qui forment des couples moléculaires avec lui, comme le fer et le plomb en forment avec le zinc dans le zinc du commerce; ces couples déterminent la première décomposition du sel de cuivre, et le cuivre déposé forme de nouveaux couples qui agissent à leur tour jusqu'à ce que tout le fer, étant recouvert de cuivre, la décomposition ne puisse plus avoir lieu.

Si nous suivons M. Fischer dans les expériences détaillées qu'il a faites sur la réduction des métaux réductibles en opérant sur les diverses dissolutions de ces métaux, nous trouvons un grand nombre de faits intéressants très-importants à connaître pour les applications, essentiellement en ce qui concerne l'or, le platine et l'argent. Il résulte en particulier de ces recherches que l'or est si facilement réductible, qu'il semblerait que la réduction tient plus encore à une propriété positive qu'il aurait, savoir sa tendance à reprendre l'état métallique, qu'à sa propriété négative, telle que sa moindre affinité relative pour l'oxygène. Non-seulement les autres métaux, mais le phosphore, et surtout le charbon et le silicium, réduisent l'or; le soufre le réduit aussi, mais plus lentement; l'azote et l'hydrogène le réduisent également. L'or se déposant en couche mince sur quelques métaux, tels que l'argent, il en résulte que la réduction s'arrête bientôt; avec d'autres, il se dépose en forme de poudre brune sans éclat métallique sur le métal réducteur ou sur les parois du vase; avec le cuivre, le fer, le zinc et le cadmium, l'or forme une pellicule à la sur-

face du liquide. Si, au lieu de la dissolution ordinaire du simple chlorure d'or, on emploie celle d'un double chlorure d'or et de sodium, la réduction s'opère mieux et plus promptement. Quelques acides et leurs sels réduisent encore l'or; tels sont en particulier les sels qui renferment des bases susceptibles de prendre un plus haut degré d'oxydation, par exemple, le sulfate de protoxyde de fer, mais à l'état d'hydrate et non à l'état sec.

Le platine est réduit par tous les métaux qui réduisent l'or, sauf le palladium, mais d'une manière beaucoup moins prompte et beaucoup moins parfaite; il se dépose quelquefois en couche métallique, mais le plus souvent sous forme d'une poudre noire qui paraît être un oxyde faible de platine. Parmi les corps non métalliques, il n'y a que le phosphore qui réduise le platine; il le réduit également dans la dissolution de simple chlorure et dans celle de chlorure double de platine et de sodium.

La réduction de l'argent présente un grand nombre de faits curieux; les seuls métaux qui réduisent l'argent également dans toutes les combinaisons sont le zinc et le cadmium; cependant le cuivre réduit aussi presque tous les sels d'argent, surtout dans leurs dissolutions ammoniacales, tandis que l'étain n'agit point en présence de l'ammoniaque; il en est de même du bismuth et de l'antimoine qui, du reste, ne réduisent l'argent que dans un petit nombre de ses dissolutions; le fer réduit tous les sels d'argent, sauf le nitrate, à moins qu'il n'y ait un léger excès d'acide, phénomène qui tient à la légère couche d'oxyde dont la surface du fer se recouvre dans l'acide nitrique et qui constitue sa passivité. Parmi les corps non métalliques, il n'y a que le phosphore qui réduise l'argent à la température ordinaire.

Le cuivre est, comme l'argent, réductible par le phosphore; aucune autre substance non métallique n'est capable d'opérer sa réduction. Parmi les métaux, le zinc est le seul qui réduise toutes les dissolutions de l'oxyde de cuivre dans les acides et dans l'ammoniaque. Le cadmium, le fer, le cobalt et l'étain ne réduisent que les sels simples, sauf les deux premiers, qui

réduisent encore l'hydrochlorate double de cuivre et d'ammoniaque.

Nous ne nous arrêterons pas pour le moment sur les réductions des sels de plomb et d'étain, sur lesquelles nous pourrons revenir plus loin dans le paragraphe troisième.

Si l'influence de l'électricité est sensible dans les phénomènes que nous venons de décrire, elle ne l'est pas moins dans les réductions opérées par un seul métal qui plonge par ses extrémités dans deux liquides différents, lesquels sont eux-mêmes en communication par l'intermédiaire d'une vessie qui les sépare, de manière à empêcher leur mélange. Il y a dans ces cas production d'un courant électrique sensible au galvanomètre, en même temps que décomposition des solutions, et réduction du métal dans celle qui est métallique, si du moins le second liquide est de l'eau, soit pure, soit légèrement acidulée, et le métal réducteur un métal facilement oxydable.

M. Becquerel a fait un grand usage de ce dernier mode d'opérer pour obtenir une foule de produits au moyen de petites forces électriques agissant pendant un temps plus ou moins long; ces produits sont en général à l'état cristallin. Le savant physicien emploie deux genres d'appareils. Les plus simples sont des tubes de 4 à 5 millimètres de diamètre fermés par un bout, au fond desquels on place une substance en poudre, telle qu'un peroxyde, sur laquelle on verse une solution métallique dans laquelle on plonge une lame d'un autre métal qui communique par son extrémité inférieure avec la substance du fond; c'est sur la surface de cette lame que se déposent à l'état cristallin les différents composés auxquels donne naissance la décomposition de la solution, jointe aux actions secondaires que détermine la présence des éléments à l'état naissant. Ainsi, pour obtenir du protoxyde de cuivre à l'état cristallin, on introduit dans le tube du bioxyde noir de cuivre, on verse dessus du nitrate de cuivre, qui ne tarde pas à humecter le bioxyde noir, et l'on plonge dans la solution une lame de cuivre; on ferme le tube hermétiquement, et, au bout de huit jours, quelquefois moins, on aperçoit sur la partie de la lame de cuivre, qui n'est pas en contact avec le bioxyde,

de petits cristaux octaédriques d'un rouge de rubis; ces cristaux augmentent peu à peu de dimensions, et finissent, après un temps plus ou moins long, par avoir 1 ou 2 millimètres de côté. Outre ces cristaux, il se dépose sur la lame du cuivre métallique en jolis cristaux octaèdres d'un grand éclat métallique. Si le tube a un petit diamètre et que la quantité d'oxyde employée soit assez considérable relativement à la dissolution de nitrate de cuivre, on voit celle-ci se décolorer peu à peu, devenir limpide et incolore; il se dépose alors sur la lame de cuivre des cristaux en aiguille de nitrate d'ammoniaque. La formation de l'ammoniaque montre que l'eau est décomposée dans cette expérience dont les résultats variables tiennent aux altérations successives qu'éprouvent les substances renfermées dans le tube. M. Becquerel a obtenu, par des procédés analogues, les oxydes de plomb, de fer, de manganèse, etc.

L'autre genre d'appareils un peu plus compliqué qu'emploie M. Becquerel consiste dans un tube recourbé en forme de U, rempli dans sa partie inférieure d'argile humectée avec du chlorure de sodium, par exemple; dans une des branches du tube on verse une solution de sulfate ou de nitrate de cuivre, dans l'autre une solution de chlorure de sodium, puis l'on plonge dans chacune d'elles le bout d'une lame de cuivre dont les deux autres extrémités communiquent ensemble; on bouche les deux ouvertures. Par suite de la réaction des deux solutions l'une sur l'autre et de la solution du chlorure sur le cuivre, il en résulte un double courant électrique, dont la direction est telle que le bout qui plonge dans la solution du nitrate est le pôle négatif du couple. L'action du courant est suffisante pour décomposer le nitrate de cuivre; du cuivre cristallisé se dépose sur l'extrémité négative; il se forme, en outre, du proto-chlorure de cuivre qui se combine avec le chlorure de sodium, combinaison qui cristallise peu à peu en tétraèdres sur la lame positive. M. Becquerel s'est servi également des mêmes tubes en U pour former des sulfures, soit simples, soit doubles; seulement, au lieu d'en employer un seul, on en réunit plusieurs, de manière à avoir une pile. On met dans une des branches de chaque tube une solution de nitrate

de cuivre avec une lame de cuivre, et dans l'autre une solution de proto-sulfure de potassium avec une lame de cuivre, de plomb ou d'argent; on réunit ensuite ces tubes en forme de pile, de façon que la lame de métal de la solution de sulfure d'un tube communique avec la lame de cuivre de la solution de nitrate de cuivre de l'autre, etc.; on a soin, pour augmenter l'intensité du courant, d'humecter l'argile qui est au fond des tubes avec la solution de nitrate de cuivre. Avec un appareil composé d'une douzaine de tubes, on aperçoit, au bout de cinq ou six heures, des cristaux de cuivre sur les lames de cuivre et des cristaux octaèdres de sulfure d'argent sur la lame d'argent, si c'est une lame d'argent qu'on a plongée dans le sulfure de potassium. Il est arrivé même à M. Becquerel que son appareil ayant fonctionné pendant quinze jours sans interruption, les lames d'argent ont été transformées entièrement en sulfure d'argent sans avoir changé de forme, seulement avec une augmentation de volume. On obtient tous les mêmes effets avec un seul couple; il faut seulement plus de temps. Il est évident que, dans ces expériences, il y a production de deux courants cheminant dans le même sens : l'un dû à la réaction des deux dissolutions l'une sur l'autre; l'autre à celle du sulfure de potassium sur l'argent; il en résulte un dépôt sur la lame de cuivre négative de petits cristaux de cuivre provenant de la décomposition du nitrate, et transport du soufre sur l'argent avec lequel il se combine; lorsque la lame d'argent est recouverte des cristaux de sulfure, le soufre, toujours transporté par le courant, pénètre entre leurs interstices et atteint l'argent qui est au-dessous, et cela jusqu'à ce qu'elle soit toute transformée en sulfure.

Cette transformation constitue une véritable *cémentation* [1], dont la nature nous offre de nombreux exemples; ainsi bien des corps métalliques éprouvent, sans perdre leur forme, une oxydation qui, en vertu d'actions lentes, marche de la surface

[1] On entend par *cémentation* l'action moléculaire en vertu de laquelle des éléments de différente nature sont introduits dans l'intérieur des corps, tandis que d'autres sont expulsés, et cela sans que le corps perde sa forme.

à l'intérieur jusqu'au centre, de proche en proche. Ce phénomène, qui ne peut avoir lieu qu'autant que des éléments sont transportés du dedans au dehors, tandis que d'autres sont transportés du dehors au dedans, est attribué, par M. Becquerel, à des forces électriques qui sont les seules capables, suivant lui, d'opérer de semblables transports, qui ont lieu de molécules à molécules. Le savant physicien français a réussi à obtenir plusieurs effets de ce genre par l'application directe et longtemps prolongée de courants voltaïques très-faibles. Ainsi, en constituant un couple avec du zinc et un cylindre de chlorure d'argent plongés dans une solution de chlorure de sodium, il a réussi à transformer graduellement tout le chlorure d'argent en argent métallique sans que la forme du cylindre ait changé. Cette cémentation électro-chimique est analogue à celle que M. Darcet avait observée à la Monnaie, où un barreau d'acier avait été abandonné, dans une armoire, à peu de distance d'un flacon renfermant une dissolution de sulfate d'argent, qui avait une fêlure par laquelle filtrait peu à peu la dissolution. Celle-ci, ayant atteint la barre d'acier, avait réagi peu à peu sur elle, et, au bout de plusieurs années, l'argent s'était tellement bien substitué au fer que l'on ne trouva plus, à la place du barreau d'acier, qu'un barreau d'argent malléable. Il est évident qu'il y avait eu formation d'une infinité de couples moléculaires, argent et fer, qui avaient déterminé l'oxydation et la dissolution du fer, en même temps que la réduction de l'argent. Ce qu'il y a de particulier dans cet ordre de phénomènes, c'est que l'effet ne se produit pas seulement à la surface, comme, par exemple, dans le cas de l'immersion d'une plaque de zinc ou de fer dans du sulfate de cuivre, mais qu'il y a pénétration inter-moléculaire et substitution d'un métal à l'autre sans altération de forme extérieure. La cémentation, en vertu de laquelle le fer se convertit en acier par la pénétration du carbone, est une de celles qui sont le plus anciennement connues et qui ont le plus fixé l'attention; on l'attribue, en général, à la pénétration successive dans le fer de l'oxyde de carbone formé dans la combustion du charbon; ce gaz, dès qu'il est en contact avec le fer à

une température élevée, abandonne une partie de son carbone pour se changer en gaz acide carbonique qui est expulsé par les mêmes interstices qui lui ont donné passage.

Quoique sans doute l'électricité joue un rôle dans les phénomènes de la cémentation, nous sommes disposés à croire qu'ils se rattachent à une cause plus générale qui comprend elle-même les effets voltaïques. Nous savons que certaines substances peuvent éprouver, sous l'influence de la chaleur ou même à la température ordinaire, un mouvement moléculaire tel qu'il en résulte un groupement différent des particules, soit un système cristallin nouveau; tels sont les cristaux de sulfate de zinc, d'arragonite, etc. Ce mouvement peut donc avoir lieu sans que le corps cesse de rester à l'état solide. Maintenant, si nous nous reportons à la manière dont nous avons conçu l'exercice de l'affinité dans la production d'un courant voltaïque [1], nous pouvons admettre que les molécules d'un corps solide peuvent se polariser comme celles d'un liquide, et que, le courant s'établissant, il y a échange des éléments constituants des particules composées successives; dès lors, dans l'exemple cité plus haut de l'acier et de l'argent, les particules d'argent viennent successivement prendre la place de celles du fer sans qu'il soit nécessaire d'admettre que l'argent ait pénétré entre les pores de l'acier. Cette polarisation des particules d'un corps admet nécessairement la mobilité des particules qui doivent, comme nous l'avons vu, tourner d'abord leur pôle positif d'un côté, puis ensuite leur pôle négatif. Or, cette mobilité est pour les corps solides, comme nous venons de le dire, un fait qui ne peut être révoqué en doute, car la chimie comme la physique en fournit plusieurs preuves parmi lesquelles, outre celles tirées des phénomènes cristallins, nous pouvons citer aussi les cas de décomposition électro-chimique de corps solides, tels que des sulfures et des iodures [2], pourvu qu'on ait soin de les chauffer assez pour, sans les rendre liquides, faciliter le mouvement relatif de leurs particules.

[1] Tome II, page 614.
[2] Tome II, p. 317.

Parmi les phénomènes naturels qui ont un rapport immédiat avec ceux qui viennent de nous occuper, nous citerons, avec M. Becquerel, les fortes altérations dont porte l'empreinte un minerai appelé *pacos*, qui se trouve à la partie supérieure de certains filons argentifères, qui est en masses variées de nature argilo-calcaire et quelquefois quartzeuse, ayant une couleur plus ou moins brune et renfermant de l'argent, soit à l'état de chlorure, soit à l'état métallique. Sur certains échantillons, l'argent forme des dendrites ou tubercules cristallins dont les parties offrent peu de cohésion. Quand on compare ces échantillons à ceux de chlorure d'argent dont on a opéré la décomposition, comme nous l'avons vu plus haut, on est frappé de la ressemblance qui existe entre eux sous le rapport moléculaire; on est conduit par là à admettre une origine commune dans le mode de formation du dépôt d'argent. Il a suffi, pour amener ces minerais à l'état où on les trouve, qu'il se trouvât des pyrites décomposables, de l'eau renfermant du chlorure de sodium, ou même de l'eau pure, des matières carbonacées conductrices et du chlorure ou du sulfure d'argent. Nous verrons, dans le paragraphe suivant, les essais que M. Becquerel a faits pour extraire les métaux de leurs minerais par un procédé artificiel analogue au procédé naturel que nous venons de décrire.

En étudiant de très-près les circonstances qui accompagnent la formation dans la nature de plusieurs produits cristallins, M. Becquerel est parvenu à démontrer leur origine électrochimique et à les former artificiellement. C'est ainsi que, si les pyrites se produisent très-fréquemment dans les tourbières, cela tient à la création de couples voltaïques au moyen des matières carbonacées en contact avec divers composés de fer, et notamment des proto-sulfates; il s'y forme également des phosphates de fer. Toutefois, il est assez difficile, dans ces formations naturelles, de distinguer la part de l'action électrochimique de celle de l'action chimique pure. Cela est surtout vrai quand il s'agit des effets qui résultent de l'action des dissolutions les unes sur les autres, ou de celle d'une dissolution sur une substance insoluble et non conductrice. Toutefois, si c'est par l'affinité seule que commence l'action, l'électricité

qui est nécessairement produite ne tarde pas à exercer sa part plus ou moins grande dans la formation du produit. En voici un exemple fourni encore par M. Becquerel. Si l'on plonge un morceau de calcaire grossier, poreux, dans une solution de nitrate de cuivre, le nitrate réagit sur le carbonate de chaux; il se dégage du gaz acide carbonique en même temps qu'il se forme du nitrate de chaux qui se dissout, et du sous-nitrate de cuivre insoluble qui se dépose en cristaux sur la surface du calcaire. La réaction s'étend peu à peu de l'extérieur à l'intérieur par un effet d'imbibition, et ne s'arrête que lorsque le sous-nitrate formé, obstruant tellement les interstices moléculaires, l'action capillaire n'a plus lieu. Si l'on plonge dans une solution de bicarbonate alcalin un peu étendue le morceau de calcaire recouvert de cristaux de sous-nitrate de cuivre, il se forme, quand l'action est prolongée, un double carbonate alcalin et de cuivre d'une couleur bleu clair, lequel, immergé dans une solution de sulfate de cuivre, est décomposé de façon qu'il en résulte un carbonate bi-basique de cuivre, qui a la composition exacte de la *malachite*, quoiqu'il n'en ait pas toute l'apparence; ce qui tient à la différence entre les circonstances qui accompagnent la formation artificielle et celles qui accompagnent la formation naturelle de ce carbonate.

Les actions naturelles sont très-complexes; avant tout elles ont pour elles le temps, car ce sont en général des actions très-lentes, dans lesquelles la présence de l'air, celle de l'eau, soit pure, soit tenant en dissolution un plus ou moins grand nombre de substances diverses, le contact accidentel de deux corps et d'autres circonstances encore, jouent un rôle plus ou moins grand pour déterminer la formation de nouveaux produits. Si on examine de près les divers terrains qui constituent la croûte superficielle de notre globe, on voit que l'eau se trouve en assez grande quantité dans les différentes formations de cette croûte, et principalement dans les parties composées de sables, d'argiles, de roches poreuses ou fendillées ou simplement perméables à l'eau. Comme ces terrains s'étendent souvent à de grandes distances, s'il existe dans la terre de l'électricité ayant une tension suffisante, ils peuvent servir à la

transporter au loin, et même jusqu'aux substances métalliques qui composent les filons et qui conduisent l'électricité. Nous avons déjà vu les expériences qui prouvent la conductibilité du sol. Quant à celles destinées à constater la présence de courants terrestres, elles sont moins faciles. M. Fox et M. Becquerel ont cependant réussi à prouver l'existence de ces courants là où deux terrains d'une nature quelconque sont humectés, et que l'eau de l'un tient en dissolution des composés qui ne se trouvent pas dans l'autre. Il faut encore dans ces terrains la présence de substances conductrices, telles que des matières carbonacées, des pyrites, des galènes. On a en vain cherché à déterminer dans ces courants une direction générale; ce sont des courants partiels, ayant une direction qui ne dépend que de la position relative des matériaux qui concourent à leur production. Mais s'ils ne peuvent pas être considérés comme pouvant exercer une action sur l'aiguille aimantée, et par conséquent comme concourant aux phénomènes du magnétisme terrestre, on peut avec quelque certitude leur attribuer la décomposition de certaines substances, ainsi que la formation de nouveaux composés, principalement à l'état cristallin; décomposition et formation qui ont lieu par l'effet d'actions très-lentes, il est vrai, mais constantes.

Il existe encore une foule de phénomènes journaliers qui sont évidemment dus à l'action continue de l'air et de l'eau. Telle est en particulier l'altération qu'éprouvent les métaux exposés à cette action, soit dans l'atmosphère, soit dans la terre; la présence sur leur surface d'un oxyde ou d'un métal étranger accélère, il est vrai, beaucoup, par la production d'un courant, l'action chimique qu'ils éprouvent. Le fer et la fonte s'altèrent d'autant plus vite, qu'il y a déjà quelques points oxydés sur leur surface. Le plomb, dès qu'il est en contact avec un métal inoxydable, tel que l'or, est immédiatement attaqué et se recouvre rapidement d'une poussière blanche de carbonate de plomb. L'argent, qui n'éprouve aucune altération de la part de l'air humide, se recouvre, dans des lieux habités, d'une couche violette de sulfure de même métal, le soufre étant fourni par les émanations animales; l'effet a lieu en

général par cémentation quand le soufre qui agit sur l'argent est lui-même à l'état de combinaison. L'argent, par un long séjour dans la mer, se change en chlorure. Il est des cas où l'altération qu'éprouve le métal n'est que superficielle; tel est celui du zinc qui, exposé longtemps aux influences atmosphériques, se recouvre d'une couche de sous-oxyde qui, n'augmentant pas d'épaisseur, préserve l'intérieur de toute altération. La différence à cet égard est grande entre le fer et le zinc, ce qui tient probablement à leur état moléculaire différent; le fer, dont les particules au fond sont très-mobiles, ainsi que le prouvent les phénomènes magnétiques et les changements de structure intérieure qu'il présente, permet beaucoup plus facilement que le zinc l'effet de cémentation qui fait pénétrer l'oxydation et toute espèce d'altération chimique jusque dans toute la masse, sans qu'elles s'arrêtent à la surface. M. Sorel a mis à profit cette faible altération du zinc, une fois qu'il est recouvert d'une couche de sous-oxyde, pour préserver le fer des actions combinées de l'air et de l'eau. Il applique dans ce but une couche de zinc sur la surface de ce métal, après l'avoir décapé dans des acides qui ont servi à purifier les huiles; l'oxyde seul est enlevé; on sèche dans une étuve, puis on plonge le fer dans un bain de zinc en fusion; lors même qu'une parcelle de zinc serait enlevée, le fer ne serait pas attaqué par l'humidité à cause de l'action voltaïque, le fer et le zinc formant un couple dans lequel le fer est négatif; mais si le zinc était enlevé sur une grande étendue, le fer s'altérerait rapidement.

Davy, comme nous l'avons vu [1], avait eu déjà longtemps auparavant l'idée d'appliquer le même principe à la conservation du cuivre qui sert de doublage aux vaisseaux, afin de le préserver de l'action corrosive de l'eau de mer; car lorsqu'on laisse un morceau de cuivre poli dans l'eau de mer, il ne tarde pas à s'altérer sous l'influence de l'eau, de l'oxygène et des substances salines qu'elle renferme. A la suite de nombreuses expériences, Davy trouva qu'en soudant çà et là de

[1] Tome II, page 623.

petites plaques de fonte ou de zinc sur la surface du cuivre, il n'y avait ni corrosion ni diminution dans ce métal après plusieurs semaines d'immersion dans la mer, lors même que pendant ce temps il avait été exposé au mouvement de la marée; mais, pour arriver à ce résultat, il fallait que la surface du métal protecteur fût comprise entre $\frac{1}{40}$ et $\frac{1}{150}$ de celle du cuivre; si elle était moindre, par exemple comprise entre $\frac{1}{200}$ et $\frac{1}{400}$, le cuivre éprouvait une perte de poids d'autant plus forte que le protecteur était plus petit. Mais on ne tarda pas à remarquer que le cuivre, devenant le pôle négatif d'un couple, il s'y déposait des substances alcalines et terreuses, en particulier du carbonate de chaux et du carbonate de magnésie, sur lesquelles des plantes et des coquilles se fixaient, d'où résultait une augmentation de poids assez forte pour que la marche des navires en fût retardée. Cet inconvénient fut trouvé assez grand pour faire renoncer à ce moyen de préserver le doublage en cuivre, et on chercha à arriver au même but en substituant au cuivre du bronze composé de 94 parties de cuivre et de 6 d'étain, dont les particules sont comme autant de petits couples voltaïques. Les essais, sauf quelques exceptions, montrèrent l'avantage de cette substitution. Toutefois, il doit arriver que, l'action corrodante de l'eau de mer s'exerçant sur les particules d'étain, tandis que le cuivre reste intact, celui-ci finisse par se changer en une masse spongieuse qui, à son tour, est aussi attaquée. Dans tous les cas, d'ailleurs, le cuivre n'est préservé que parce que, faisant partie d'un couple voltaïque, il se dégage sur sa surface de l'hydrogène qui le désoxyde à mesure que l'action de l'eau de mer tend à l'oxyder, opération qui doit finir par altérer son état moléculaire en le désagrégeant.

On avait tenté d'appliquer le même moyen de préservation à divers objets en fer, et en particulier aux instruments de chirurgie; mais on y a renoncé, vu que le but n'était point atteint, l'effet protecteur ne pouvant se produire qu'autant qu'il peut y avoir formation de couple voltaïque, et par conséquent présence de l'eau ou d'un conducteur humide quelconque; la simple exposition dans l'air ne suffit pas. Le meil-

leur mode de préservation, dans ces cas-là, consiste à revêtir l'objet qu'on veut préserver d'une couche d'un métal inoxydable d'or ou de platine. Nous verrons, dans un paragraphe suivant, les ressources qu'offre à cet égard l'application de l'électricité voltaïque, tout en renvoyant aux travaux de Van-Beck et de Schœnbein pour ce qui concerne la protection galvanique du fer.

Après ce coup d'œil général jeté sur les propriétés de l'électricité qui sont essentiellement utilisées dans les applications chimiques, nous allons entrer dans quelques détails plus circonstanciés sur celles de ces applications dont l'expérience a consacré les avantages et qu'elle a rendues usuelles; elles peuvent se classer sous trois chefs : extraction et préparation des métaux, application des métaux en couches minces, et enfin galvanoplastie ou moulage des métaux.

§ 2. Application à la préparation des corps simples.

Davy est le premier qui eut l'idée d'employer la force dynamique de l'électricité à séparer des éléments unis par une puissance d'affinité trop grande pour céder aux forces chimiques ordinaires. Nous avons déjà vu comment il parvint à décomposer la soude, la potasse et presque tous les oxydes alcalins et terreux[1]. Le potassium et le sodium s'obtiennent plus facilement et en plus grande quantité lorsqu'on se sert de mercure pour électrode négatif. On pratique dans ce but une cavité dans un fragment de potasse ou de soude légèrement humecté, et on la remplit de mercure; ce fragment est ensuite placé sur une lame de platine qui communique avec le pôle positif d'une pile dont le pôle négatif aboutit à un fil de platine qui plonge dans le mercure. L'alcali et l'eau sont décomposés, et le radical de l'alcali, en se combinant avec le mercure, forme un amalgame qu'on met dans l'huile de naphte pour le préserver de l'action de l'air. Puis, pour obtenir le métal pur, on place l'amalgame dans un tube recourbé aux deux extrémités dont

[1] Tome II, page 284.

on a chassé préalablement l'air. En chauffant l'extrémité où se trouve l'amalgame, on volatilise le mercure, et le métal reste; on a soin, pour le préserver de l'oxydation, de le conserver dans l'huile de naphte. C'est en opérant de la même manière, mais en se servant d'un sel ammoniacal (carbonate ou hydrochlorate), que Berzélius obtint l'amalgame ammoniacal qui lui fit croire à l'existence dans l'ammoniaque d'un métal analogue au potassium et au calcium, et qu'il nomma ammonium. L'apparence du phénomène est en effet tout à fait favorable à cette manière de voir; on aperçoit le mercure où plonge l'électrode négatif se gonfler, s'épaissir, prendre une consistance butireuse et une couleur blanc d'argent, en même temps que le volume devient cinq à six fois plus considérable. Mais quand on retire cet amalgame, il se convertit rapidement en ammoniaque avec dégagement d'hydrogène, et le mercure reprend son état naturel. MM. Gay-Lussac et Thénard, qui avaient également étudié avec soin cet amalgame, le considérèrent comme le résultat de la dissolution de l'hydrogène et de l'ammoniaque dans le mercure; ce qu'il y a de certain, c'est qu'il ne peut avoir de durée permanente, et qu'on n'a jamais pu isoler l'ammonium.

Nous ne nous arrêterons pas aux divers résultats obtenus par Davy, qui tout en lui démontrant l'existence des radicaux métalliques dans les divers oxydes alcalins et terreux, ne lui permirent pas de recueillir une assez grande quantité de ces nouveaux métaux pour en étudier les propriétés diverses; nous ne reviendrons pas non plus sur la méthode de M. Becquerel, qui, au moyen de petites actions, mais longtemps prolongées, a réussi à obtenir plusieurs de ces métaux à l'état cristallin. Nous arrivons immédiatement aux procédés au moyen desquels M. Bunzen est parvenu à préparer par voie galvanique, d'une manière beaucoup plus prompte et en beaucoup plus grande quantité, la plupart des métaux dont nous venons de parler, et en particulier le magnésium, le barium, l'aluminium, le calcium, etc. C'est sur les chlorures de ces métaux qu'agit M. Bunzen, soit en les dissolvant dans l'eau de manière à avoir une dissolution concentrée dont il élève la température

en même temps qu'il la soumet à l'action décomposante du courant électrique, soit en les faisant fondre à l'état anhydre dans un creuset de porcelaine fortement chauffé et en se servant pour électrodes de charbon de coke bien recuit semblable à celui dont il fait usage pour sa pile.

M. Bunzen estime que dans ce genre de décompositions électrolytiques il faut avoir égard à la *densité* du courant, c'est-à-dire à son intensité divisée par la surface de l'électrode sur lequel se dépose le métal réduit; suivant lui, la faculté que possède le courant de vaincre les affinités augmente avec cette densité. Voici la disposition adoptée par M. Bunzen pour obtenir une grande densité capable de vaincre les affinités chimiques les plus énergiques. Un creuset de charbon rempli d'acide chlorhydrique forme l'électrode positif de la pile; ce creuset est placé lui-même dans un creuset de porcelaine qu'on chauffe dans un bain-marie. Au centre du creuset de charbon on place un petit vase poreux, destiné à recevoir le liquide à décomposer; on y plonge une lame de platine étroite qui sert d'électrode négatif. On voit que, grâce à cette disposition, le courant rayonne de toute la surface intérieure du creuset de charbon sur la surface très-peu étendue de la lame ou du fil de platine. Dans ces conditions le chrome, le manganèse et beaucoup d'autres métaux se déposent avec la plus grande facilité des solutions aqueuses de leurs chlorures. C'est ainsi qu'en opérant sur une dissolution de proto-chlorure de chrome on peut obtenir du chrome métallique en plaques de plus de 50 millimètres carrés; ces plaques sont cohérentes, mais friables; la surface en contact avec la lame de platine est parfaitement polie et brillante. Le chrome, qu'on ne peut obtenir à l'état de pureté que par ce procédé, ressemble parfaitement au fer quant à son aspect extérieur. Si l'on diminue graduellement l'intensité du courant, la réduction du métal cesse peu à peu et est remplacée par la production de l'oxydule de chrome anhydre. Le chlorure de manganèse se comporte exactement comme le protochlorure de chrome; on peut obtenir du manganèse métallique en plaques de plus de 100 millimètres carrés, friables et brillantes d'un côté. Ce métal s'oxyde à l'air humide presque aussi

facilement que le potassium. En diminuant l'intensité du courant ou obtient, au lieu de manganèse métallique, de l'oxyde manganéso-manganique noir. — Si on remplace la lame de platine par un fil de platine amalgamé, on parvient à réduire le barium et le calcium en opérant avec des dissolutions chaudes et concentrées des chlorures de ces métaux acidulées par l'acide chlorhydrique. La réduction du barium se fait plus facilement que celle du calcium, car dans le cas du calcium l'électrode négatif de platine se recouvre très-vite d'une couche de chaux qui interrompt le courant; il faut donc, si l'on veut obtenir des quantités un peu notables de métal, détacher souvent la couche qui recouvre le fil et amalgamer celui-ci de nouveau. Il n'est pas nécessaire de faire remarquer que l'on obtient ainsi des amalgames de calcium et de barium, d'où l'on retire facilement les deux métaux en les chauffant de manière à volatiliser le mercure, dans un courant de gaz hydrogène.

Avant de passer au second procédé employé par M. Bunzen, celui où l'on agit, non sur des dissolutions aqueuses de chlorures, mais sur les chlorures anhydres amenés à l'état de fusion par une haute température, nous ne pouvons laisser passer sans une observation critique l'influence attribuée par le savant allemand à ce qu'il nomme la densité du courant. Il nous est impossible d'admettre qu'un même courant puisse avoir une puissance de décomposition plus ou moins grande, suivant qu'il est plus ou moins concentré. Sa puissance décomposante ne peut provenir que de l'énergie de la force électro-motrice qui lui donne naissance et non de son mode de distribution dans le liquide qu'il traverse. Le degré de concentration de ce liquide, joint au peu d'étendue de la surface négative, n'ont d'autre effet que de rendre, d'une part, la décomposition plus rapide, et d'accumuler, d'autre part, sur un plus petit espace la couche métallique qui provient de cette décomposition. Il en résulte que les éléments métalliques ne sont pas de nouveau attaqués par la solution toujours plus ou moins acide, à mesure qu'ils se déposent, comme cela a lieu lorsqu'étant répartis sur une surface très-étendue, ils y forment une couche très-mince. C'est exactement ce qui se

passe dans la décomposition de l'eau acidulée, où l'on n'aperçoit pas de gaz sur la surface des électrodes de platine quand ceux-ci ont une très-grande surface, et que le courant n'est pas très-fort, quoique cependant capable d'opérer la décomposition; les bulles de gaz se trouvent tellement disséminées sur ces grandes surfaces, et sont par conséquent si petites, qu'elles se dissolvent dans le liquide à mesure qu'elles se déposent, et cependant on a dans la polarisation des électrodes la preuve que la décomposition a lieu. Nous n'insisterons pas sur ce point; il nous serait, du reste, facile de montrer de bien des manières que l'idée que les propriétés spécifiques d'un courant peuvent varier avec sa densité ne peut être admise.

C'est d'abord à la préparation du magnésium que M. Bunzen a appliqué sa méthode, qui consiste à opérer sur le chlorure fondu; Davy avait obtenu ce métal au moyen de l'action combinée du courant et du mercure qui s'amalgamait avec le métal au fur et à mesure de sa réduction; mais il lui fallait plus de temps pour le magnésium que pour les métaux des terres alcalines. M. Becquerel avait réussi, au moyen des actions lentes, en opérant sur du chlorure de magnésium, dans lequel plongeait une lame de platine servant d'électrode négatif à une pile faiblement chargée, à obtenir sur cette lame de petits cristaux octaèdres d'un blanc argentin, qui possèdent toutes les propriétés du magnésium. M. Bunzen prend du chlorure de magnésium bien desséché; il l'introduit dans un creuset de porcelaine vernie, dont la cavité intérieure est divisée en deux compartiments au moyen d'une paroi en porcelaine poreuse qui ne plonge pas tout à fait jusqu'au fond; un couvercle en porcelaine, percé de deux trous, recouvre le creuset; ces deux trous sont destinés à servir de passage à deux électrodes en charbon. Dès que le chlorure est entré en fusion, on tient les deux électrodes respectivement en communication avec les pôles d'une pile de dix couples de Bunzen ou de Grove; la décomposition a lieu aussitôt, le chlore se dégage dans l'un des compartiments et le magnésium dans l'autre; comme ce métal est moins dense que le chlorure, on a soin de le retenir

dans le liquide au moyen d'entailles dirigées obliquement de bas en haut qu'on a pratiquées dans l'électrode de charbon, sur lequel il doit se déposer; autrement il monterait à la surface et serait brûlé. On peut obtenir ainsi en peu de temps un culot de magnésium du poids de plusieurs grammes. C'est un métal blanc et brillant comme l'argent; il offre une cassure cristalline. On peut le limer, le scier et le laminer; à la température ordinaire, il est aussi ductile que le zinc, avec lequel il a beaucoup de rapports. Sa densité est de 1,743.

L'aluminium a été préparé par M. Bunzen de la même manière que le magnésium, en opérant sur un chlorure double d'aluminium et de sodium, vu que le chlorure d'aluminium pur ne se fond pas, mais se volatilise à une température peu élevée. M. Deville qui, de son côté, avait préparé l'aluminium par une méthode analogue, c'est-à-dire par la décomposition électrolytique du chlorure double d'aluminium et de sodium, avait trouvé, après beaucoup d'essais, un grand avantage à modifier le procédé qu'avait adopté M. Bunzen pour le magnésium. Voici celui auquel il s'était arrêté. On prépare le bain à décomposer en mêlant dans une capsule de porcelaine chauffée à 200° environ, 2 parties de chlorure d'aluminium et 4 parties de sel marin sec et pulvérisé; la combinaison s'effectue bientôt avec dégagement de chaleur, et on obtient un liquide très-fluide. On remplit de ce liquide jusqu'à la même hauteur verticale un creuset de porcelaine vernie et un tube poreux bien sec placé au milieu du creuset, dont il traverse le couvercle au moyen d'un large trou dans lequel il est introduit à frottement dur. Ce même couvercle est percé d'une fente pour laisser passer une lame de platine large et épaisse qui sert d'électrode négatif, tandis qu'un nouveau cylindre de charbon de cornue introduit dans le tube poreux sert d'électrode positif. Il faut avoir soin de maintenir le fond du tube poreux à quelques centimètres de distance du fond du creuset de porcelaine et de chauffer constamment le creuset, que par précaution on introduit dans un creuset de terre plus grand. Dès qu'on fait passer le courant d'une pile, l'aluminium se dépose avec du sel marin sur la lame de platine; le chlore,

avec un peu de chlorure d'aluminium, se dégage dans le vase poreux avec production de fumée, qu'on fait disparaître en introduisant de temps en temps du sel marin sec et pulvérisé dans le vase poreux. Il ne faut qu'un petit nombre de couples (deux suffisent à la rigueur) pour décomposer le chlorure double, qui ne présente que peu de résistance à l'électricité. On enlève de temps en temps la lame de platine quand elle est suffisamment chargée du dépôt métallique et salin qu'on détache et qu'on fond dans un creuset de terre. Après le refroidissement, on traite par l'eau cette matière pour dissoudre le sel marin, et on obtient une poudre cristalline grise qu'on réunit en culots par plusieurs fusions successives en employant comme fondant le chlorure double d'aluminium et de sodium. On trouve toujours à la fin de l'opération dans le vase poreux une grande quantité de charbon qui se détache de l'électrode positif.

L'aluminium obtenu de cette manière n'est jamais très-pur, à moins qu'on n'emploie du chlorure d'aluminium extrêmement pur [1]; mais M. Deville l'obtient à un très-grand degré de pureté en le préparant par le sodium. On sait à quel degré de perfection le savant chimiste français a porté ce mode de préparation, qu'il a réussi à rendre très-économique [2]. Nous

[1] M. Deville a remarqué que, lorsqu'on décompose par la pile un chlorure d'aluminium et de sodium impur, on obtient une matière métallique qui, le plus ordinairement, est de l'aluminium combiné avec une petite quantité de charbon, et surtout avec du silicium. Le silicium s'en sépare avec facilité lorsqu'on attaque cette fonte par l'action prolongée de l'acide chlorhydrique, concentré et bouillant. Ce silicium est en lames métalliques, brillantes, semblables à la limaille de platine. Cependant ce n'est pas un véritable métal, et M. Deville, qui a préparé en grande quantité le silicium par des procédés purement chimiques et qui en a étudié toutes les propriétés, croit que cette forme du silicium est au silicium ordinaire ce qu'est le graphite au charbon.

[2] M. Deville a perfectionné assez la fabrication du sodium pour que ce métal ne lui revienne qu'à un peu moins de 10 fr. le kilogramme; il a également réussi à fabriquer le chlorure d'aluminium pour 3 fr. le kilogramme; mais le prix de revient de l'aluminium lui-même n'a pu être encore fixé à cause de l'imperfection des appareils employés jusqu'ici, qui faisait que près des trois quarts du sodium et de l'aluminium étaient brûlés et détruits en pure perte. Il est à espérer qu'on parviendra à éviter ces inconvénients et à obtenir l'aluminium à un prix

ne pouvons nous étendre sur ce sujet, qui sort tout à fait de notre cadre, puisqu'il s'agit d'un procédé purement chimique; nous nous bornerons à ajouter que l'aluminium est un métal qui, à cause de ses propriétés remarquables, finira très-probablement par devenir usuel, et, si ce n'est pas à la pile voltaïque qu'on devra de le posséder en grande quantité, ce sera toujours du moins à elle qu'on devra la découverte de son existence. L'aluminium, quoique d'une densité très-faible (2,56 et 2,67 quand il a été passé au laminoir), a beaucoup de dureté et d'élasticité; il est blanc comme l'argent, seulement un peu bleuâtre; il est très-malléable, très-ductile et très-bon conducteur de l'électricité. Il fond à une température plus élevée que le zinc, mais plus basse que l'argent. L'écrouissage exerce une grande influence sur les propriétés de l'aluminium; ainsi, au moment où il vient d'être coulé, il a la dureté de l'argent vierge à peu près; quand il vient d'être écroui, il ressemble presqu'à du fer pour la dureté et l'élasticité. Il a, surtout lorsqu'il est pur, une sonorité excessive; suspendu à un fil et frappé d'un corps sec, un lingot d'aluminium produit le son d'une cloche de métal. Mais ce qui le rend surtout précieux pour l'usage, c'est la résistance qu'il présente à l'action des acides et des agents qui attaquent la plupart des métaux usuels. Il est même à cet égard supérieur à l'argent, et surtout à l'étain, qu'il pourrait remplacer avec avantage dans une foule d'usages économiques. Du reste, le rang électro-chimique de l'aluminium, qui a été déterminé par Wheatstone à Londres, et par M. Hulot à Paris, le place bien dans le nombre des métaux les moins attaquables.

La méthode qui a servi à la préparation du magnésium et de l'aluminium a été également, avec quelques modifications, appliquée par M. Matthiessen à la préparation du calcium et du strontium, ainsi qu'à celle du lithium. Pour obtenir le strontium, M. Matthiessen place un petit vase poreux dans

peu éloigné de 5 fr. le kilogramme, qui est celui qu'indique la théorie du procédé. On comprend que, vu son peu de densité, l'aluminium sera, à volume égal, d'un prix très-inférieur à celui des autres métaux, tels que l'argent, avec lesquels il a un si grand nombre de rapports.

un petit creuset, et, après avoir mis dans les deux vases du chlorure de strontium mélangé avec un peu de sel ammoniac, de manière que le niveau du chlorure fondu soit un peu plus élevé dans le vase poreux que dans le creuset, il fait aboutir dans ce dernier vase l'électrode négatif qui consiste dans un fil de fer très-fin enroulé autour d'un fil plus gros qu'on engage dans un tuyau de pipe, de manière que ce dernier fil ne dépasse que de 2 millimètres l'extrémité inférieure de ce tuyau ; l'électrode positif est un cylindre creux de fer placé dans le creuset et qui entoure le vase poreux. Il faut régler la chaleur pendant l'opération, de manière qu'il se forme une croûte à la surface du chlorure fondu dans le vase poreux; le métal se rassemble au-dessous de cette croûte. Le strontium ressemble au calcium pour la couleur; il se présente sous forme de lames brillantes d'un jaune de laiton clair, mais plus foncé cependant que la couleur du calcium. Sa densité est de 2,54, tandis que celle du calcium est de 1,578 en moyenne; dans la série électro-chimique, le strontium se trouve placé entre le calcium et le magnésium. Comme le calcium, il décompose facilement l'eau, s'oxyde à l'air humide et brûle avec un vif éclat quand on le chauffe.

Pour préparer le lithium, il suffit d'agir sur du chlorure de lithium pur fondu dans un petit creuset de porcelaine avec un courant de 4 à 6 couples, en prenant pour électrode positif une petite baguette de charbon de gaz, et pour électrode négatif un fil de fer de l'épaisseur d'une aiguille à tricoter. Après quelques secondes, il se forme au-dessus de la surface du chlorure fondu un petit globule de lithium qui s'attache au fil de fer et qui, au bout de deux ou trois minutes, atteint la grosseur d'un petit pois. Pour l'obtenir, on soulève le fil de fer avec le globule qui y est attaché au moyen d'une cuiller en fer. On retire ensuite le fil du métal encore fondu, qui est garanti du contact de l'air par une couche de chlorure de lithium. Après avoir laissé refroidir la cuiller sous l'huile de naphte, on enlève le métal avec un canif. En répétant ces opérations de trois en trois minutes, on parvient à réduire en très-peu de temps une once de chlorure de lithium. Ce métal,

quand il vient d'être fraîchement coupé, possède la couleur de l'argent, mais il se ternit rapidement au contact de l'air. Il fond à 180° cent.; il est plus dur que le potassium et le sodium; mais il est plus mou que le plomb, quoiqu'il puisse être tiré en fil comme lui. C'est le plus léger de tous les métaux connus; il flotte à la surface de l'huile de naphte; sa densité est de 0,5936. Le lithium est beaucoup moins oxydable que le potassium et le sodium; il s'enflamme à une température très-supérieure à celle de son point de fusion; jeté sur l'eau, il s'oxyde, mais ne fond pas comme le sodium. La silice, le verre et la porcelaine sont attaqués par le lithium à une température inférieure à 160°.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur l'application des forces électriques à la réduction des métaux alcalins et terreux; ce que nous avons dit suffit pour en faire comprendre l'importance. Il est vrai qu'on a trouvé, pour le plus grand nombre de ces métaux, des modes de préparation purement chimiques plus économiques, et, dans quelques cas, plus faciles que le mode électro-chimique; mais c'est à ce dernier mode qu'on doit, comme nous l'avons déjà remarqué, d'avoir, entre les mains de Davy, fait découvrir l'existence de ces métaux jusqu'alors inconnus, et il n'est pas improbable qu'il ne devienne une fois plus usuel quand on aura réussi à se procurer à bon marché le courant électrique.

Toutefois, M. Becquerel a déjà cherché à faire entrer dans le domaine industriel l'emploi de l'électricité pour le traitement électro-chimique des minerais d'argent, de plomb et de cuivre. Il nous serait difficile de donner une description complète des essais nombreux tentés par l'illustre physicien et des procédés auxquels il s'est arrêté. On en trouvera tous les détails dans le deuxième volume de son *Traité de l'Électricité*. Nous nous bornerons à indiquer brièvement les principes qui l'ont dirigé et quelques-uns des résultats qu'il a obtenus à la suite de travaux nombreux et persévérants.

Nous ne nous arrêterons pas aux préparations à faire subir aux minerais pour les rendre susceptibles d'être traités électro-chimiquement; le traitement des minerais d'argent, de

plomb et de cuivre, par la voie humide, repose sur la propriété que possèdent le chlorure d'argent et le sulfate de plomb de se dissoudre dans une solution saturée de sel marin (chlorure de sodium) et le sulfate de cuivre dans l'eau. Il faut donc chlorurer l'argent dans les minerais; ce qui se fait de différentes manières, soit par voie humide, soit par voie sèche ou de grillage; cela dépend de l'état de combinaison de l'argent dans le minerai : la voie humide doit être employée si l'argent est à l'état métallique ou à l'état de simple sulfure; la voie sèche est nécessaire si l'argent est à l'état de double sulfure. Quant au plomb, il faut le sulfater, ce qui se fait en agissant, soit par voie humide, soit par voie sèche, sur le minerai de plomb, qui est ordinairement de la galène, soit sulfure de plomb. Il existe une galène argentifère dont on peut à la fois sulfater le plomb et chlorurer l'argent au moyen d'un grillage opéré sur le minerai qu'on mélange avec une certaine proportion de sel marin. Le cuivre se trouvant dans les minerais à l'état métallique, d'oxyde ou de sulfure, il faut, pour le sulfater, employer la voie humide dans les deux premiers cas et le grillage dans le dernier. Des précautions particulières sont nécessaires pour opérer ce grillage quand on agit, comme c'est le cas le plus fréquent, sur des sulfures multiples, et en particulier sur le cuivre pyriteux, qui est une combinaison de sulfure de cuivre et de sulfure de fer.

Les minerais d'argent, de plomb et de cuivre étant chlorurés ou sulfatés, et les dissolutions des composés métalliques étant faites dans l'eau salée ou simplement dans l'eau, s'il s'agit du cuivre, on parvient à obtenir ces trois métaux à l'état métallique, soit en plongeant dans leurs dissolutions des métaux plus oxydables, soit en faisant intervenir une action électrique extérieure. Le premier moyen, qui consiste à décomposer immédiatement la dissolution de chlorure d'argent au moyen du fer, du plomb ou du cuivre, est très-imparfait, en ce qu'il ne permet pas de réduire tout l'argent renfermé dans la dissolution et en ce que l'argent réduit n'est jamais tout à fait pur. Aussi nous ne nous en occuperons pas, non plus que de celui qui consiste à précipiter l'argent par la chaux ou

par une autre base puissante, et qui est également peu satisfaisant.

Dans le traitement électro-chimique proprement dit, on se sert de couples voltaïques composés de zinc, de fer ou de plomb, associés à des lames de cuivre, de fer-blanc ou à des morceaux de charbon bien recuit, qui sont mis en contact immédiat avec la dissolution métallique, tandis que les métaux oxydables sont placés dans un vase poreux, rempli seulement d'eau salée et plongeant dans cette dissolution, puis mis en communication métallique avec le cuivre, le fer-blanc ou le charbon. Il résulte de cette combinaison voltaïque un courant électrique qui décompose le chlorure d'argent, et qui peut même décomposer d'autres composés métalliques si l'on se sert du zinc pour métal oxydable; le zinc amalgamé est encore préférable. Il faut aussi employer le mercure pour établir le contact entre les lames positives et négatives d'une part, et le fil conducteur qui doit les unir d'autre part. M. Becquerel a trouvé qu'en réunissant un certain nombre d'appareils simples, de manière à former une pile (de six couples, par exemple), on accélère la décomposition du chlorure sans augmentation de dépense. Ainsi, dans l'espace de six heures, une lame de l'appareil composé de six couples, a fourni $0^{gr},690$ d'argent, tandis que, dans le même temps, un seul couple agissant seul en a fourni la moitié. Dans les deux cas, c'était également sur la lame négative du couple que se déposait l'argent. On peut également intercaler dans le circuit de deux ou plusieurs couples, semblables à ceux dont nous venons de parler, un couple indépendant formé d'une lame de zinc amalgamé et d'une lame de fer-blanc; il en résulte une augmentation sensible d'effet, surtout si on a soin de chauffer jusqu'à l'ébullition le couple indépendant; mais alors il faut remplacer la lame de fer-blanc, qui est attaquée à chaud par la dissolution saline, par un morceau de charbon des cornues à gaz. Quel que soit le système employé, on remarque toujours que, dans les premières heures du traitement électro-chimique, les 0,75 de l'argent sont enlevés, et que le reste a beaucoup de peine à être séparé de la dissolution.

Sans nous arrêter au traitement des minerais de plomb et de cuivre, pour lesquels M. Becquerel suit des procédés analogues à celui dont nous venons de parler pour l'argent, nous nous bornerons à dire qu'il résulte des nombreuses recherches faites par ce physicien, que les minerais d'argent peuvent être traités sans difficulté par le procédé électro-chimique, pourvu que le sel marin soit à bas prix ou qu'il y ait suffisamment de bois dans la localité pour opérer un grillage quand la chloruration ne peut pas être faite par voie humide. Cependant, dans l'état actuel de la méthode électro-chimique, on préfère en pratique le système plus simple de l'amalgamation mexicaine ou de Freyberg. Ce ne serait qu'au cas où le mercure viendrait à manquer qu'on recourrait au procédé électro-chimique, qui est le seul praticable lorsqu'il s'agit du traitement des galènes argentifères et des pyrites cuivreuses argentifères.

Toutefois, si l'emploi des forces électriques n'a pas pu encore prendre rang dans la grande industrie pour l'extraction des métaux de leurs minerais et s'il est resté un procédé plutôt scientifique, il existe néanmoins quelques cas particuliers, outre ceux que nous avons indiqués dans ce paragraphe, dans lesquels cette partie de la métallurgie peut mettre à profit avec avantage l'action d'un courant voltaïque, c'est lorsqu'il s'agit de l'extraction de métaux précieux tels que l'or, des dissolutions qui n'en renferment plus qu'une faible quantité. Pour découvrir la présence de l'or dans une dissolution de ce métal dans l'eau régale (acide nitro-muriatique), il suffit d'un couple zinc et platine dont le zinc plonge dans une dissolution de sel marin séparée de la dissolution d'or dans laquelle plonge le platine, au moyen d'un peu d'argile humide. Le platine a la forme d'un fil fin dont le bout libre passe dans un tube de verre dont il dépasse de quelques millimètres l'extrémité qui est soudée à la lampe. C'est sur ce bout de fil de platine que se précipite l'or, ce qui permet non-seulement de constater la présence d'une petite quantité d'or dans une dissolution, mais encore de la recueillir. On s'assure qu'il ne reste plus d'or dans la dissolution, en remplaçant le premier fil de

Digitized by Google

platine par un second disposé d'une manière semblable; et dès qu'on est sûr ainsi que l'opération est terminée, on coupe le fil recouvert d'or à ras du tube, puis on le pèse, on dissout l'or dans l'eau régale étendue, on pèse de nouveau le fil, et la différence donne le poids de l'or. On évite toute perte d'or en fixant à l'extrémité du fil de platine une capsule du même métal d'un très-petit diamètre, dont la surface extérieure est recouverte de vernis, afin que l'or se précipitant dans l'intérieur puisse être recueilli en entier.

Le même procédé peut être appliqué à séparer l'or d'une dissolution qui renferme d'autres métaux. Pour séparer l'or du cuivre, on prend un couple cuivre et platine, dont le platine plonge dans la dissolution d'or et de cuivre dans l'eau régale, et le cuivre dans une dissolution de cuivre dans le même liquide à peu près au même degré de concentration, séparée de la première par un diaphragme en terre poreuse. Le courant électrique qui résulte de l'action du protochlorure de cuivre sur le cuivre décompose le chlorure d'or et dépose l'or seul sans une trace de cuivre sur le platine. Une expérience, dans laquelle on avait introduit dans une solution concentrée de cuivre une dissolution renfermant $0^g,032$ d'or, a montré qu'on pouvait retirer par le procédé que nous venons d'indiquer, à un milligramme près, tout l'or renfermé dans la dissolution; car la lame de platine sur laquelle l'or s'était déposé, et qui pesait $0^g,224$ avant l'expérience, en a pesé $0^g,255$ après, ce qui montrait que le poids de l'or retiré était de $0^g,031$. On peut séparer de la même manière l'or du fer et du plomb en prenant dans le premier cas une dissolution de perchlorure de fer et une lame de fer ou de cuivre si la dissolution renferme du cuivre outre le fer, et dans le second une lame de cuivre. On obtient ainsi l'or renfermé dans les dissolutions à un milligramme près. L'emploi du cuivre comme métal positif a l'avantage de donner, lorsqu'il est associé avec le platine pour former un couple, un courant qui n'a que la puissance nécessaire pour décomposer le chlorure d'or, ce qui fait que l'or seul se dépose sur le platine, ainsi qu'on peut le constater directement au moyen de réactifs. Nous avons insisté sur ces détails,

parce que dans les arts où l'on fait usage de l'or, et en particulier dans l'art de la dorure et dans celui de la mise de l'or en couleur, il est important de pouvoir retirer tout l'or qui reste quelquefois en minime quantité dans les dissolutions dont on fait usage, la précipitation par le fer et par le sulfate de fer, qui est le moyen employé pour séparer l'or, étant insuffisante.

La différence si grande qui existe entre les propriétés électro-chimiques de l'or et celles des métaux avec lesquels on l'allie, m'avaient fait penser qu'on pourrait, en formant un couple dans l'acide nitrique très-pur avec l'or pur et l'or allié, déterminer par le degré d'intensité du courant le titre de l'alliage. Plusieurs essais que j'ai faits, tout en me donnant des résultats satisfaisants, sont restés, quant à la précision, au-dessous des méthodes ordinaires. M. Oersted, qui avait le premier tenté ce moyen de faire des essais en l'appliquant à l'argent, avait également trouvé que ce ne peut être qu'un procédé approximatif. Toutefois il peut présenter des avantages dans certains cas particuliers où les autres procédés sont difficilement applicables.

§ 3. Application à la formation de dépôts métalliques en couches minces. — Dorure, argenture, etc.

Nous avons vu dans le § 1er que lorsqu'on plonge dans une dissolution métallique un métal plus oxydable que celui qui est en combinaison, ce dernier se précipite à l'état métallique en formant sur la surface du premier un dépôt tantôt pulvérulent, tantôt plus ou moins adhérent; nous avons remarqué que ces effets proviennent du concours simultané de l'affinité et des forces électriques. On avait déjà depuis assez longtemps mis à profit ce genre d'actions pour produire des dépôts adhérents dans certains cas particuliers; mais le plus remarquable est celui de l'étamage des épingles, car dans ce cas-là, contrairement au principe qui règle la précipitation des métaux, c'est le plus oxydable, l'étain, qu'on fait précipiter sur le moins oxydable, le cuivre ou le laiton. Or, pour obtenir ce résultat,

ce n'est point l'affinité chimique seule, mais la puissance voltaïque d'un couple qu'on employait. En effet, on jette un paquet d'épingles non étamées dans une dissolution qui renferme avec divers sels de l'oxyde d'étain; il ne s'opère aucun effet, quelle que soit la durée de l'immersion; mais dès qu'on plonge dans la dissolution un morceau d'étain qui touche seulement l'une des épingles qui du reste sont toutes en contact métallique les unes avec les autres, tout le paquet s'étame aussitôt. Celles des épingles qui ne se trouvent pas en contact avec l'étain ne s'étament pas. Il est évident qu'il y a formation d'un couple voltaïque qui décompose le sel d'étain et transporte l'étain sur le cuivre des épingles, où il forme un dépôt adhérent. Cette adhérence n'est pas toujours facile à obtenir; dans l'étamage du fer, on l'obtient en plongeant des lames de tôle, dont la surface a été préalablement bien décapée, dans un bain d'étain recouvert de matières en fusion qui empêchent l'oxydation; il en est de même pour le zincage du fer; cependant, dans ce cas, le procédé électro-chimique est préférable. La pression ou le frottement produisent également l'adhérence, comme dans le cas du plaqué, en déterminant un contact plus immédiat entre les parties.

La dorure des métaux est, de toutes les opérations qui ont pour but d'obtenir un dépôt adhérent, celle qui a le plus exercé la sagacité des inventeurs. La dorure par simple immersion dans une solution neutre de chlorure d'or très-étendue a été l'une des premières méthodes employées pour le cuivre, et pour le fer qu'on recouvrait préalablement d'une couche de cuivre. Il en a été de même pour l'argenture; mais ces procédés de dorure et d'argenture ne donnèrent que des couches d'or et d'argent très-peu adhérentes et très-minces. On en était donc venu généralement à la dorure au mercure, qui consiste à recouvrir la pièce à dorer (de cuivre, de laiton ou d'argent), après l'avoir soigneusement décapée, d'un amalgame d'or, puis à la passer au feu; le mercure, s'évaporant, laisse l'or à la surface de la pièce, en couche plus ou moins épaisse et parfaitement adhérente. Mais dans la pratique de ce procédé, les ouvriers, exposés sans cesse au contact du mercure liquide ou à

l'action du mercure en vapeur, éprouvent au plus haut degré les effets de l'empoisonnement par les émanations mercurielles. Il est vrai que les fourneaux à tirage très-fort, imaginés par M. Darcet, évitent en grande partie cet inconvénient, mais non totalement, et d'ailleurs ils ne sont pas malheureusement d'un usage général.

M. Elkington avait imaginé un procédé de dorure par immersion bien supérieur à ceux qui avaient été pratiqués auparavant et sur lequel nous reviendrons, lorsqu'en 1840 je fis connaître les résultats que j'avais obtenus en employant les forces électriques d'une manière directe pour le dorage des métaux. J'avais déjà, en 1828, réussi à dorer des fils de platine et d'argent en m'en servant comme électrodes négatifs dans une solution de chlorure d'or; mais je n'avais pas continué ce genre de recherches, lorsque les effets de galvanoplastie, qui feront l'objet du paragraphe suivant, me firent présumer qu'un procédé analogue à celui employé dans cet art nouveau pourrait servir au dorage. Voici ce procédé. Je place l'objet à dorer (argent, cuivre ou laiton) dans une dissolution de chlorure d'or très-étendue renfermée dans un cylindre en vessie ou en baudruche plongeant dans un bocal rempli d'eau légèrement acidulée, où se trouve un cylindre creux de zinc qui entoure la vessie cylindrique. Le zinc est mis en communication au moyen d'un fil métallique avec l'objet à dorer, qu'on a soin de décaper préalablement. L'or se porte sur cet objet, qui est en effet l'électrode négatif du couple, et y adhère plus ou moins fortement, tandis que le zinc se dissout dans l'eau acidulée. La dissolution d'or doit être aussi neutre que possible, et étendue avec de l'eau distillée dans des proportions telles qu'il y ait 5 milligrammes d'or dans 1 centigramme cube de la dissolution. On peut se faire une idée du peu d'or qu'exige ce procédé par l'expérience suivante, dans laquelle 10 cuillers à café en argent ont été dorées avec 160 centigrammes cubes de la dissolution, qui renfermait par conséquent 8 décigrammes d'or, et cependant la dissolution était loin d'être épuisée, car elle conservait encore sa couleur jaune. En supposant toutefois que les 10 cuillers eussent enlevé tout

l'or, chaque cuiller en aurait pris 80 milligrammes; ce qui, en portant l'or au prix de 4 francs le gramme, fait revenir à 22 centimes le prix du dorage de chaque cuiller. Il faut faire l'opération en deux ou trois immersions, et avoir soin de bien frotter l'objet avec un linge fin chaque fois qu'on le retire de la dissolution. La couleur de la dorure dépend du titre de l'or dissous et aussi de la nature de l'objet à dorer; elle est plus rouge sur le laiton que sur l'argent. Pour obtenir une dorure bien brillante et bien adhérente, il faut frotter avec le linge ou la peau, et même employer le brunissoir.

Sans nous arrêter à différents détails de ce procédé, nous remarquerons qu'il a l'inconvénient de laisser réduire un peu d'or par le zinc du couple et par la vessie qui sert de diaphragme; que de plus la dorure est souvent peu adhérente, ce qui tient à ce que la dissolution d'or n'est jamais assez neutre pour ne pas exercer une légère action chimique sur la surface du métal à dorer, et pour ne pas altérer par conséquent sa netteté. J'avais réussi à diminuer ces inconvénients, et en particulier à rendre plus neutre la dissolution, ce qui avait permis au procédé de donner des résultats satisfaisants entre les mains d'ouvriers habiles, quand MM. Elkington et de Ruolz vinrent apporter à ce nouvel art des perfectionnements qui ont fini par le rendre assez usuel pour qu'il ait généralement remplacé le dorage par le mercure.

Deux points essentiels caractérisent ces perfectionnements : le premier, l'emploi d'une dissolution d'or autre que le chlorure ordinaire; le second, celui d'une pile substituée au simple couple, ce qui évite la présence du zinc dans le même vase où est la dissolution d'or, et par conséquent ne rend plus nécessaire l'intervention d'un diaphragme poreux. Ce mode d'appliquer la force électrique au dorage est celui dont j'avais eu l'idée dans mes premiers essais de 1828, et auquel j'avais renoncé, espérant à tort plus d'économie et plus de facilité de main-d'œuvre dans l'emploi d'un appareil simple.

M. Elkington, ainsi que nous l'avons dit plus haut, avait commencé par opérer le dorage par voie humide, sans l'inter-

vention directe de l'électricité. De concert avec M. Wright, il avait fait plusieurs expériences, desquelles il résultait que le meilleur moyen pour opérer ce genre de dorage consistait à dissoudre l'or dans l'eau régale et à mêler avec le perchlorure qui en résulte un grand excès de bicarbonate de potasse, en faisant bouillir le tout pendant assez longtemps. On plonge ensuite dans la liqueur bouillante les pièces de laiton, de bronze ou de cuivre bien décapées, et la dorure s'applique immédiatement, une partie du cuivre de la pièce se dissolvant pour remplacer l'or qui se précipite, comme dans les autres cas analogues. Il paraît que le choix du bicarbonate de potasse influe beaucoup sur le resultat; il vaut mieux, pour que l'opération marche bien, qu'il ne soit pas trop pur et qu'il renferme quelques matières organiques, ce qui facilite la réduction du perchlorure à l'état de protochlorure, auquel tend à l'amener l'ébullition longtemps prolongée de sa dissolution avec celle du bicarbonate de potasse, et qui convient beaucoup mieux à la dorure. L'inconvénient de ce procédé est que nécessairement la dorure a une épaisseur limitée, puisqu'une fois que toute la surface du métal à dorer est recouverte d'or, il ne peut plus s'en précipiter, ainsi que nous l'avons vu et expliqué dans notre premier paragraphe. Il résulte, en effet, d'expériences comparatives, faites avec beaucoup de soin, que la meilleure dorure par voie humide n'a pu fixer que $0^{gr},0422$ d'or par décimètre carré, tandis que la plus pauvre en mercure en fixe $0^{gr},0428$; de sorte que la dorure par voie humide arrive à peine, dans le cas le plus favorable, au degré d'épaisseur que la plus mauvaise dorure au mercure est obligée d'atteindre; ce qui fait qu'il est impossible que la première puisse remplacer la seconde.

L'inconvénient que nous venons de signaler ne s'applique nullement au second procédé de M. Elkington, qui consiste à plonger l'objet à dorer comme électrode négatif d'une pile à courant constant, dont l'électrode positif est de platine, dans une dissolution renfermant 31 grammes 25 centigrammes d'or converti en oxyde, 5 hectogrammes de cyanure de potassium ordinaire et 4 litres d'eau qu'on a fait bouillir ensemble pen-

dant une demi-heure. Le liquide ainsi obtenu dore très-vite quand il est bouillant, et plus lentement quand il est froid. On peut par ce procédé augmenter l'épaisseur de la couche d'or à volonté, et se rendre compte de cette épaisseur par la durée de l'immersion.

C'est le 8 décembre 1840 que M. Elkington avait pris son brevet d'invention pour son second procédé; le 19 décembre de la même année, M. de Ruolz en prenait un également pour le dorage à la pile; ses essais avaient porté sur une telle variété de dissolutions d'or, qu'il avait fini par trouver celles qui sont à la fois les moins chères et les plus convenables, savoir : le chlorure double d'or et de sodium dissous dans la soude, du chlorure d'or dissous dans du ferro-cyanure jaune de potassium et du sulfure d'or dissous dans le sulfure de potassium neutre. Il est assez singulier que cette dernière dissolution soit une des meilleures, en particulier dans le dorage du bronze et du laiton, qui sont si facilement attaqués par le soufre. En pratique, on a généralement adopté la dissolution qui renferme 1 partie de chlorure sec, 2 de ferro-cyanure jaune de potassium et 100 d'eau. On met quelquefois 10 parties au lieu de 2 de ferro-cyanure; mais il paraît qu'on éprouve l'inconvénient lorsque le cyanure est trop abondant, que l'or se redissout en partie à mesure qu'il se précipite sur l'objet à dorer. Nous reviendrons, au reste, un peu plus loin sur cette question des dissolutions. Examinons auparavant les avantages du dorage à la pile opéré au moyen des dissolutions de M. de Ruolz, tels qu'ils résultent du rapport de la commission de l'Académie des Sciences, à la suite d'expériences faites sous sa direction.

Non-seulement le platine, l'argent, le cuivre, le laiton et le bronze se dorent de la manière la plus facile et la plus régulière, mais le packfond, l'acier et le fer se dorent également; ce qui constitue un grand avantage industriel à cause de l'usage si étendu de ces métaux. L'étain, il est vrai, exige, pour être bien doré, d'être recouvert préalablement d'une petite pellicule de cuivre, ce qui se fait facilement au moyen de la pile et d'une dissolution de cuivre; alors il se dore aussi aisément que l'argent, et constitue l'un des plus beaux vermeils.

Indépendamment de la généralité de son application, la dorure dont il s'agit est d'une solidité et d'une égalité à toute épreuve; ainsi on a vu une capsule de laiton dorée résister très-efficacement à l'action de l'acide nitrique bouillant. Enfin, non-seulement la précipitation de l'or est parfaitement régulière, mais elle est exactement proportionnelle au temps de l'immersion; ce qui permet de juger de l'épaisseur de la dorure par la durée de l'immersion, et de la varier à volonté. Ainsi, dans trois immersions successives de deux minutes chacune, d'une même plaque d'argent poli de 50 centimètres carrés de surface, on a trouvé toujours une quantité d'or déposée de $0^{gr},63$ chaque fois; la dissolution se composait de 1 gramme de chlorure sec dissous dans 100 grammes d'eau contenant 10 grammes de cyano-ferrure jaune de potassium; la pile était une pile de Daniell de six couples. Dans l'expérience que nous venons de citer, la température de la dissolution était de 60° centigrades; dans une autre expérience faite dans les mêmes conditions, sauf que cette température était de 35°, la quantité d'or déposée n'a été, pour chaque immersion de deux minutes de durée également, que de $0^{gr},028$, mais elle est restée toujours la même pour chacune des douze immersions qu'on a pratiquées; on voit que la température, comme nous l'avons déjà remarqué, exerce une influence sensible sur la rapidité avec laquelle se forme le dépôt.

L'argenture s'opère aussi facilement que la dorure; la meilleure dissolution est celle qui renferme 1 gramme de cyanure d'argent sec dissous dans 100 grammes d'eau contenant 10 grammes de cyano-ferrure jaune de potassium. Tous les métaux s'argentent aussi facilement qu'ils se dorent; il faut même un courant moins fort (4 couples suffisent au lieu de 6); l'argenture est parfaitement adhérente et régulière, et l'épaisseur de la couche est aussi proportionnelle à la durée des immersions; l'élévation de la température accélère l'opération comme pour l'or.

Lorsqu'il s'agit d'appliquer le platine, il faut remplacer le cyanure, dont la décomposition s'opère très-lentement, par le chlorure double de platine et de potassium dissous dans la po-

tasse caustique; on obtient ainsi une dissolution qui permet de platiner avec la même facilité et la même promptitude que lorsqu'il s'agit de dorer ou d'argenter. Le platine est si extensible qu'il suffit d'un seul milligramme pour recouvrir uniformément une surface de 50 millimètres carrés d'une couche de platine, qui n'a par conséquent que $\frac{1}{100000}$ de millimètre d'épaisseur et qui est cependant suffisante pour protéger le métal qui a reçu ce dépôt.

M. de Ruolz ne s'est point borné à l'application des métaux précieux, il est parvenu aussi à cuivrer, plomber, étamer et zinguer divers métaux usuels. On emploie pour le cuivrage le cyanure double de cuivre et de potassium; seulement il faut plus de temps pour cuivrer que pour dorer et argenter. Le plombage du fer et celui des autres métaux s'opère au moyen d'une dissolution d'oxyde de plomb dans la potasse. L'étamage du cuivre, du laiton, du fer, se fait également avec une dissolution d'oxyde d'étain dans la potasse ou avec la dissolution employée dans l'étamage des épingles que l'on forme en dissolvant l'étain dans la crème de tartre. Il suffit d'un seul couple pour opérer le dépôt de l'étain, sauf lorsqu'il s'agit du zinc qui en exige plusieurs pour être étamé. Le zincage n'en exige en général qu'un qui est employé à la décomposition, soit du sulfate de zinc, soit de l'oxyde de zinc dissous dans la potasse. Déjà, avant M. de Ruolz, M. Sorel avait introduit dans l'industrie le zincage du fer, soit par voie sèche, soit par voie humide. Les dépôts de cobalt et de nickel s'effectuent encore, d'après les mêmes procédés, toujours avec des dissolutions alcalines; ce genre d'application n'a pas été encore très-utilisé dans les arts.

Après ce coup d'œil rapide sur les perfectionnements introduits dans l'art d'appliquer les métaux les uns sur les autres, revenons avec un peu plus de détails sur ce qui concerne l'application des métaux précieux, et celle de l'or en particulier, vu que c'est surtout la pratique du dorage, dont l'usage est si général, qui a éprouvé le plus de modifications de la part des nouveaux procédés.

Peu de temps après ma première publication de l'appli-

cation de l'électricité au dorage, M. Boettiger avait décrit un appareil simple, analogue au mien, avec lequel il avait réussi à dorer très-bien, non-seulement l'argent et le cuivre, mais le fer et l'acier, pourvu que ces deux derniers métaux fussent très-bien décapés. Il faisait usage d'une solution très-étendue de chlorure d'or aussi neutre que possible, placée dans un tube en verre fermé dans sa partie inférieure par un diaphragme en vessie. Ce tube est placé lui-même dans un bocal plus large rempli d'eau légèrement acidulée, et au fond duquel est un disque de zinc amalgamé qu'on met en communication au moyen d'un fil métallique avec l'objet à dorer plongé lui-même dans le chlorure d'or. M. Becquerel, malgré la supériorité incontestable, dans le plus grand nombre de cas, des appareils composés, estime cependant, comme M. Boettiger, que l'appareil simple peut avoir aussi son utilité. Voici celui qu'il recommande pour éviter l'endosmose, et par conséquent la perte d'une partie de la dissolution d'or. On prend (fig. 421) une cloche en verre ayant à sa partie inférieure une tubulure assez large qu'on remplit de kaolin ou d'argile ordinaire,

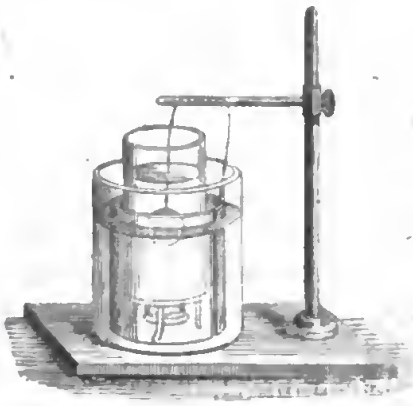


Fig. 421.

retenu par une coiffe de linge fixée autour de la paroi extérieure de la tubulure à l'aide d'un fil. On place ensuite la tubulure de la cloche dans une ouverture pratiquée au milieu d'un disque en bois supporté par trois pieds; puis on introduit la cloche remplie de la dissolution d'or dans un bocal en verre ou en faïence contenant une solution de sel marin plus ou moins concentrée, de façon que les deux solutions soient à la même hauteur, pour éviter qu'un des liquides passe d'un vase dans l'autre. On plonge dans la dissolution de sel marin une lame de zinc et l'objet à dorer dans la dissolution d'or, en établissant la communication entre eux au moyen d'un fil métallique. Si l'on veut s'aider de l'action de la chaleur, on met

le tout dans un vase rempli d'eau, que l'on place sur un fourneau. Pour avoir une dorure uniforme, il faut que, autant que possible, toutes les parties de la surface à dorer soient placées de la même manière par rapport au zinc, ce qui est plus difficile à obtenir dans l'appareil de la figure 421 que dans celui que j'avais employé dans mes premiers essais, où le chlorure d'or était placé dans un cylindre en baudruche enveloppé d'un cylindre de zinc concentrique. Il faut seulement, dans l'appareil de la figure 421, que le cylindre de zinc entoure symétriquement la tubulure, et retourner fréquemment la pièce afin de régulariser l'action.

L'appareil simple peut servir quand il ne s'agit que de dorer des pièces d'une très-petite dimension. On peut même, dans ce cas, se contenter de mettre en contact une lame de zinc avec l'objet à dorer en les plongeant un instant ensemble dans une dissolution d'or. L'opération se fait dans un vase de verre ou de porcelaine en chauffant la dissolution même jusqu'au point de l'ébullition, si l'on veut avoir une bonne dorure. On place sur le vase une tige de bois, à laquelle est assujettie une lame de zinc recourbée dont les deux extrémités seulement viennent toucher la dissolution; c'est avec cette lame que l'objet à dorer est mis en contact avant l'immersion. Il faut avoir soin de nettoyer de temps en temps les extrémités immergées de la lame de zinc, afin d'enlever l'or précipité. L'argent, le cuivre, le laiton, le packfond se dorent très-bien de cette manière; pour obtenir un dorage aussi bon sur le fer et sur l'acier, il faut avoir soin de les plonger auparavant dans de l'acide nitrique étendu d'eau, afin de les bien décaper.

Les appareils composés sont, malgré quelques avantages que peuvent présenter les appareils simples, beaucoup plus généralement employés. On peut adopter pour ces appareils la disposition suivante. Le vase *a b* (fig. 422), contenant la dissolution d'or, est placé sur un fourneau, afin de pouvoir élever la température. Une tige en cuivre ou en laiton *c d* repose sur le bord du vase et est destinée à soutenir avec des crochets les objets à dorer. Une lame d'or servant d'électrode positif, ce qui permet à l'or de se dissoudre à mesure qu'il est réduit à l'é-

lectrode négatif, entoure le vase intérieurement. La pile est composée de deux ou d'un plus grand nombre de couples,

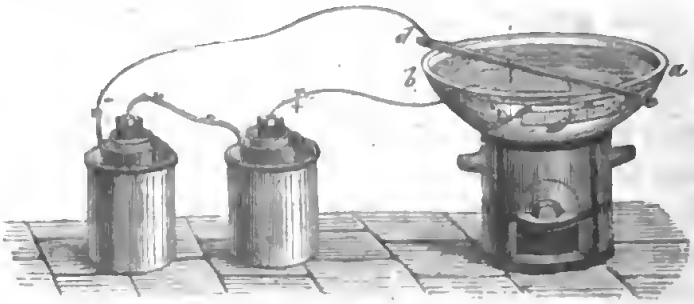


Fig. 422.

suivant le nombre et la grandeur des pièces à dorer. Le fil qui part du pôle positif communique avec un fil d'or soudé à la lame qui plonge dans le vase, et le fil qui part du pôle négatif est mis simplement en contact avec la tige de métal qui est sur le vase. On a essayé de remplacer la pile par une machine magnéto-électrique produisant des courants d'induction dirigés tous dans le même sens; mais comme le courant dont on a besoin n'est pas d'une intensité bien grande, la dépense occasionnée par l'emploi de la pile n'est pas assez considérable pour qu'il soit nécessaire d'y avoir égard dans les opérations de ce genre. Il n'est pas cependant impossible qu'on trouve plus tard de l'avantage dans l'emploi des courants d'induction pour les applications industrielles.

L'un des points les plus importants et les plus difficiles à obtenir dans le dorage électrique, c'est la parfaite adhérence du dépôt. Il faut, pour cela, avoir bien soin de dérocher et de décaper la pièce à dorer, c'est-à-dire de nettoyer parfaitement sa surface; le dérochage consiste à la recuire et à enlever ensuite, au moyen des acides, la couche d'oxyde qui s'est formée. Si, après le dérochage, la surface n'est pas nette, on peut décaper immédiatement par l'acide nitrique concentré, puis dans un mélange de cet acide, de sel marin et de suie. Les procédés de dérochage et de décapage varient avec la nature des métaux soumis à l'opération et suivant qu'on veut avoir une surface

polie ou mate. Une fois la surface bien nette, il faut éviter son séjour trop prolongé dans l'air, car une des causes qui s'opposent le plus à l'adhérence est la présence d'une couche mince d'air sur la surface qui doit recevoir le dépôt. Une trop grande intensité dans le courant lui est aussi nuisible. Il semble qu'il faut, pour que le dépôt métallique soit bien adhérent, que ses molécules puissent venir se loger sans trouble dans les interstices moléculaires du corps qu'il recouvre. Ce n'est pas une combinaison qui s'opère, mais un effet d'agrégation et de cohésion; car on peut, par des forces physiques, enlever en feuille l'or déposé; ce qui se fait d'autant moins difficilement que la couche est plus épaisse; aussi lorsqu'on ne peut pas obtenir une adhérence parfaite, il ne faut donner que peu d'épaisseur à la couche d'or. L'emploi du mercure contribue beaucoup à l'augmentation de l'adhérence; aussi emploie-t-on avec avantage, dans la dorure électrique, le procédé indiqué déjà par M. Darcet pour la dorure au feu, qui consiste à tremper dans une dissolution étendue de proto-nitrate de mercure les pièces décapées, immédiatement avant de les plonger dans la dissolution d'or. M. Becquerel remarque que lorsqu'on a eu soin de bien blanchir une pièce par plusieurs immersions successives dans la solution de proto-nitrate de mercure, en la frottant avec une peau très-douce pour bien étendre le mercure, la dorure électro-chimique qu'elle reçoit présente un aspect mat; le mat et le poli n'étant pour la dorure, suivant M. Becquerel, que le résultat du mat ou du poli primitif de la surface à dorer. Il existe aussi plusieurs apparences dans la dorure qui dépendent de l'intensité même du courant, indépendamment de la nature de la dissolution et de celle du métal à dorer, ce qui tient aux variations dans l'état moléculaire de la couche d'or déposée. Ainsi on peut, en diminuant graduellement l'intensité du courant, voir le dépôt d'or passer successivement et par des nuances souvent insensibles, du noir brunâtre au noir purpurin, au brun, au rouge, au rouge jaunâtre et enfin à la dorure jaune qui est la plus parfaite, c'est-à-dire celle dont l'adhérence est la plus grande.

Parmi les applications de la dorure, l'une des plus impor-

tantes dans les arts est la dorure des différentes parties d'une montre. Cette dorure doit être très-solide pour pouvoir résister au frottement qu'éprouvent les diverses pièces d'un mouvement d'horlogerie; aussi a-t-on craint un moment d'être obligé de renoncer à l'emploi de la dorure électrique dans ce cas et de continuer à faire usage de celle au mercure, qui, outre les inconvénients déjà signalés sous le rapport de la salubrité, avait celui de risquer d'altérer la forme des pièces qui sont en général très-délicates, par la nécessité où l'on était de les exposer au feu. Cet inconvénient, joint à celui qui résultait de l'altération de la trempe des pignons d'acier fixés aux roues, par l'effet de leur exposition au feu, avait même fait renoncer à dorer les roues des mouvements d'horlogerie. Il en résultait que non-seulement les roues qui sont en laiton devenaient vite ternes et noires, ce qui est d'un effet très-désagréable, mais que le laiton usait les pignons d'acier; car le laiton a la malheureuse propriété, lorsqu'il est exposé à un frottement continu sur l'acier, d'user ce dernier métal, et même quelquefois de gripper, ce qui n'a point lieu avec l'or, probablement à cause de l'absence de formation d'oxyde. Il était donc bien important de surmonter les difficultés que présentait encore la dorure électrique, de manière à pouvoir l'appliquer aux mouvements d'horlogerie; c'est à quoi on est parvenu, ainsi que nous allons l'indiquer en entrant dans quelques détails.

Les fabricants d'horlogerie remettent ordinairement au doreur les pièces à dorer bien adoucies, sans aucun trait; or, comme quelquefois il reste à la suite de cet adoucissage une légère couche de graisse ou d'huile, il est nécessaire de faire passer préalablement ces pièces dans de l'eau de soude bouillante pour les dégraisser; sans cela on serait exposé à ce que la couche déposée ne fût pas adhérente et à ce qu'elle présentât des taches vertes par la combinaison de l'huile avec la potasse du sel de la dissolution. Ce n'est pas tout; il faut, avant d'appliquer la dorure, grainer la pièce, c'est-à-dire y déterminer cette apparence de pointillé que l'usage a introduit, on ne sait trop pourquoi, mais sans laquelle le doreur verrait son ouvrage refusé. Ce grainage, pour divers motifs trop longs à énumérer,

ne peut pas se faire en creux en enlevant du métal par les acides. Il faut qu'il s'opère en relief par application du métal, et pour cela on se sert d'une poudre d'argent excessivement fine, qu'on se procure par différents moyens, les uns chimiques, les autres mécaniques, mais que les doreurs trouvent toute préparée dans le commerce. On mêle 1 partie en poids de cette poudre avec 12 parties de sel ordinaire très-sec et tamisé très-fin, 4 parties de crème de tartre également tamisée fin; puis, quand le mélange est intime, on ajoute de l'eau de manière à former une pâte claire; on y plonge une brosse semblable à une brosse d'habit, mais dont les soies sont plus serrées et plus fines. Quand la brosse a été bien imprégnée de la pâte, on s'en sert pour frotter les pièces piquées sur une plaque de liége, en ayant soin de ne pas frotter toujours dans le même sens, de peur d'avoir un grain allongé, tandis qu'il faut qu'il soit rond. Si on frotte trop longtemps le grain devient trop gros; il faut se borner à frotter une ou deux minutes. Les proportions de sel et de crème de tartre du mélange peuvent varier suivant le but qu'on se propose; ainsi, si on met plus de crème de tartre que la proportion indiquée ci-dessus, on obtient un grain plus fin et plus serré; on peut même arriver à avoir un grain qui donne un dorage mat en mettant pour 1 partie d'argent 18 de sel de cuisine et 8 de crème de tartre. Une fois la pièce grainée, il faut la *gratte-bosser*, opération qui se fait au moyen d'un instrument en forme de pinceau qu'on nomme *gratte-bosse* et qui est fait en fil de laiton très-fin; on frotte la pièce grainée avec cette espèce de brosse, en ayant soin que la surface soit humectée d'un liquide astringent tel qu'une infusion de marrons d'Inde; on obtient ainsi un grainé brillant et la pièce peut alors être dorée. Les doreurs pour l'horlogerie se sont depuis longtemps servis soit de la dissolution Ruolz, soit de celle indiquée par Bœttiger, et qu'on obtient en dissolvant le chlorure d'or sec dans une solution de cyanure de potassium préparée d'après la méthode de Liebig, soit d'autres encore; mais l'expérience leur a montré que celle qui produisait les meilleurs résultats était la dissolution de l'ammoniure d'or dans le cyanure blanc de potassium; elle est remarquable par la belle couleur d'or pur qu'elle donne,

par sa préparation facile[1] et par toutes les teintes qu'elle peut procurer en étant alliée à l'argent et au cuivre.

Nous ne reviendrons pas sur l'opération même du dorage, qui s'effectue en général suivant un procédé analogue à celui que nous avons décrit à la fig. 422. Ce qu'il importe le plus, c'est de savoir trouver l'intensité du courant convenable pour avoir la meilleure dorure. Car le même bain peut, suivant cette intensité, donner quatre ou cinq nuances différentes. La couleur de l'or la plus difficile à obtenir est celle de l'or à 18 karats, teinte qu'on tient à donner aux boîtes de montre qu'on dore. Les ouvriers en général se contentent pour apprécier l'intensité de leur courant d'évaluer approximativement la quantité d'oxygène qui se dégage à l'électrode positif, évaluation tout à fait inexacte, à cause de l'étendue et de la nature variables de cet électrode qui est tantôt en or, tantôt en platine, tantôt même en cuivre. Ce qu'il faudrait, ce serait d'adapter à chaque pile un galvanomètre et un rhéostat qui permît de retrouver pour chaque cas l'intensité voulue[2]; il serait nécessaire pour cela d'avoir des instruments d'un maniement plus commode pour les simples ouvriers que ceux que possède la science; nous ne croyons pas que ce fût une chose difficile à trouver.

Le même bain peut donc donner une série de couleurs diffé-

[1] Pour préparer cette dissolution, on dissout le chlorure d'or, provenant d'un ducat, traité par l'acide nitro-muriatique, dans deux décilitres d'eau, on ajoute environ 30 grammes d'ammoniaque liquide en remuant avec un tube de verre; il se forme un précipité d'ammoniure d'or, qui est fulminant lorsqu'il est sec; aussi ne faut-il point le sécher; on se borne à filtrer et à laver le précipité jusqu'à ce que l'eau qui passe n'ait plus la moindre saveur salée. On plonge alors le filtre contenant le précipité encore humide dans une solution de cyanure de potassium qui renferme 10 grammes de cyanure pour la quantité d'or correspondante au ducat, ce qui fait 3 fois le poids de l'or. On tient le tout en ébullition avec un demi-litre d'eau distillée qu'on remplace à mesure qu'elle s'évapore, jusqu'à ce que le bain ait perdu complétement l'odeur ammoniacale; alors on retire le bain du feu, on le filtre, et il est prêt à servir en l'étendant plus ou moins; les couleurs sont plus éclatantes avec un bain concentré, mais il faut un courant plus fort.

[2] Cette idée appartient à M. Mathieu du Locle (canton de Neufchâtel), qui a publié un petit traité pratique du dorage galvanique auquel nous avons emprunté plusieurs détails.

rentes suivant l'intensité du courant; plus cette intensité est grande relativement à la surface à dorer, plus la dorure est rouge. Pour avoir une dorure pâle il faut ajouter de l'argent au bain; si la quantité d'argent ajoutée est de $\frac{1}{10}$ la dorure est déjà pâle, mais si elle est de $\frac{1}{5}$ on a l'or vert. Comme l'argent se dépose plus facilement que l'or, il faut de temps en temps en ajouter, mais en très-petite quantité, pour que la dorure reste pâle. Pour l'avoir rouge, il vaut mieux cuivrer l'objet avant de le dorer plutôt que de mettre du cuivre dans la dissolution, car on aurait alors une dorure brune terne. Ajoutons qu'un bain qui a servi et qui est déjà passablement épuisé d'or donne une dorure plus rouge qu'un bain neuf. La mise en couleur ordinaire qui consiste à agir sur l'or avec un mélange de certains sels[1], ne peut être employée utilement sur la dorure électrique; en effet, dans cette dorure, l'or appliqué est généralement de l'or fin sans alliage, sur lequel l'action du mélange est nulle, la mise en couleur ne peut réellement être utile que pour l'or à $\frac{750}{1000}$ ou au-dessous, puisque les sels n'ont d'autre effet que de dissoudre les métaux attaquables par eux et de mettre l'or fin à nu à la surface de l'objet.

A propos des différentes nuances que peut affecter la dorure, il ne sera pas inutile de revenir un instant sur la manière d'obtenir le mat qui, comme nous l'avons dit, est la conséquence de ce que la surface à dorer est mate elle-même. Or, il y a plusieurs manières de rendre mate la surface à dorer : moyens mécaniques, en employant de petits instruments ou broches de cuivre ayant à leurs extrémités de petits points que l'on imprime sur le métal; moyens chimiques, en corrodant la surface par des acides ou des mélanges de sel. Mais les deux moyens qui conviennent le mieux à la dorure électrique, c'est d'abord

[1] Voici la composition du mélange dont on se sert en général pour mettre l'or en couleur :

Nitrate de potasse.	40 parties.
Sulfate d'alumine.	25
Chlorure de sodium.	35
	100

de grainer avec l'argent, suivant le procédé que nous avons indiqué, la surface à dorer, c'est aussi de recouvrir cette surface d'une couche mince de cuivre, au moyen de la décomposition du sulfate de cuivre opérée par un courant d'une intensité convenable, ce qui fait aussi un mat très-beau qui se reproduit sur la couche d'or. On obtient également un très-beau mat doré en dorant les cadrans ou autres pièces d'argent blanchies; blanchiment qu'on opère en plongeant l'objet d'argent ou argenté, après l'avoir fait chauffer jusqu'au rouge brun, mais lorsqu'il n'est plus rouge, dans une dissolution bouillante de 3 parties d'eau et de 1 d'acide sulfurique. Puis, après l'avoir laissé environ trente secondes dans ce bain bouillant, on le lave à l'eau chaude et on le plonge dans l'alcool pour enlever l'eau; on l'essuie ensuite avec un linge fin. Il faut avoir soin de tenir la pièce qu'on veut blanchir avec un fil de platine ou d'or, sans cela elle se tacherait dans le bain.

Il arrive souvent qu'il y a dans les objets à dorer des portions qui ne doivent pas l'être, et qui, par conséquent, doivent être recouvertes d'un vernis qui empêche l'or de s'y déposer; la composition et le mode d'application de ce vernis ne sont pas sans importance, surtout lorsqu'il s'agit de garantir les pignons d'acier que portent les roues en laiton des mouvements d'horlogerie et qui doivent être éprouvés par l'effet du grainage au frottement duquel il faut que ce vernis résiste, vu qu'on ne peut l'en préserver. L'un des meilleurs vernis consiste dans un mélange de 3 parties de résine colophane avec 1 partie de cire jaune, 1 d'oxyde rouge de fer et 2 ou 3 de bétuline, substance résineuse qu'on obtient en traitant l'écorce de bouleau par l'alcool, et qui a l'avantage de n'être pas soluble dans les alcalis [1].

[1] Il existe différents procédés pour recouvrir les pignons d'acier du vernis protecteur, opération qu'on nomme *épargner* les pignons; il faut seulement auparavant laver la roue entière à l'alcool pour enlever les corps gras; puis, après avoir épargné les pignons, on décape, on sèche la pièce à la sciure de bois, on la pique sur un liége; ensuite on la graine et on la gratte-bosse. Cela fait, on la dore, on dissout l'*épargne* (c'est le nom donné au vernis qui recouvre le pignon) dans l'huile d'olive chaude; on gratte-bosse la dorure, et enfin on lave la pièce dans l'alcool et on l'essuie avec un linge fin.

L'application de ces vernis permet également de produire sur la même pièce des dorures de différentes couleurs et même d'appliquer à volonté l'or, l'argent sur des endroits déterminés à l'état mat ou brillant et d'établir ainsi de charmants ouvrages en damasquinerie.

Parmi les applications de la dorure électrique, il en est une qui, imaginée par M. Hammann, artiste distingué de Genève, a donné des résultats satisfaisants; elle consiste à remplacer dans la gravure à l'eau-forte le vernis ordinaire du graveur par une couche d'or très-mince déposée sur la planche de cuivre par le courant électrique. Cette couche n'offre pas plus de résistance que le vernis pour le travail à la pointe, et elle est pourtant assez forte pour résister au mordant, qui est, comme on le sait, l'acide nitrique étendu.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans dire quelques mots des essais qu'on a faits pour appliquer aux arts la découverte de Nobili des dépôts colorés obtenus à l'électrode positif par la décomposition de l'acétate de plomb. M. Becquerel a étendu et perfectionné ce procédé qui repose sur les mêmes principes que celui du dorage et de l'application des métaux par voie électrique, avec la seule différence qu'ici ce sont des oxydes et non des métaux réduits qu'on dépose sur les surfaces qu'on veut recouvrir. C'est principalement les peroxydes de fer et de plomb que M. Becquerel a réussi à déposer en couches minces adhérentes, non-seulement sur l'or, le platine et l'argent, mais, ce qui est bien plus essentiel, sur le cuivre, le fer et autres métaux usuels, afin de les préserver des influences atmosphériques. Il faut, pour opérer ces dépôts, que les peroxydes soient dissous dans les alcalis; savoir : le peroxyde de plomb dans la potasse, et le peroxyde de fer dans l'ammoniaque. On obtient avec la première dissolution sur une plaque de fer ou de cuivre, servant d'électrode positif, un dépôt d'une couleur d'un noir plombé sur le fer et d'un noir de jayet sur le cuivre, qui est susceptible de prendre un beau poli en restant très-adhérent. Avec la seconde dissolution, la couleur du dépôt est brun-rouge, pourvu que la lame reste peu de temps immergée; mais si le courant passe plus longtemps, la couche déposée

prend une teinte de plus en plus foncée qui finit par devenir violette. Ces dépôts n'ont pour but, en raison de l'inaltérabilité des oxydes dont ils sont formés, que de préserver les surfaces métalliques qu'ils recouvrent de toute altération de la part des agents atmosphériques; mais s'il s'agit d'ornementation, il faut employer le dépôt de peroxyde de plomb en couches très-minces, ce qui permet d'obtenir des teintes colorées aussi remarquables par leur variété que par leur éclat. Il faut pour que cet éclat soit le plus grand possible que la surface destinée à recevoir le dépôt ait été poli au mieux en étant frottée avec la peau et le rouge d'Angleterre, ce qui détermine la réflexion d'une plus grande quantité de lumière et rehausse par conséquent la vivacité des couleurs produites par le jeu de la lumière dans ces lames minces. On ne peut obtenir ces dépôts que sur l'or ou l'argent ou sur les métaux fortement dorés ou argentés, vu que le métal devant être plongé dans la dissolution comme électrode positif, il serait attaqué s'il était d'une nature oxydable, et alors sa surface étant altérée, les couches de peroxyde ne s'y déposeraient plus de manière à produire les effets désirés.

Pour recouvrir les surfaces métalliques d'un dépôt de peroxyde de plomb qui présente des teintes aussi vives que celles des lames minces de Newton, on attache l'objet *a b*, dont on veut colorer la surface, au pôle positif d'une pile de Bunzen de 2 ou 3 couples; on le plonge dans le vase AB contenant la dissolution de peroxyde de plomb dans la potasse; puis on prend à la main un fil de platine C, communiquant avec le pôle négatif de la pile, et on le promène dans le liquide à une certaine distance de la lame. Aussitôt le dépôt commence et présente les couleurs successives des lames minces. Si le fil est très-près du milieu de la lame, il se forme sur sa surface une série d'anneaux colorés de nuances très-vives, ce qui est dû à ce que le dépôt a une épaisseur variable du centre à la circonférence; ce sont des anneaux de ce genre qu'avait obtenus Nobili; mais si

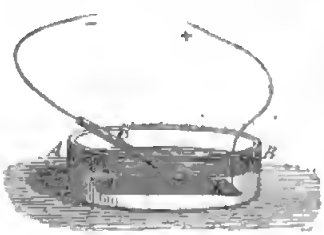


Fig. 423.

l'on tient le fil un peu loin de la lame, celle-ci se colore d'une manière à peu près uniforme. Seulement les couleurs changent avec la durée de l'opération, c'est-à-dire avec l'épaisseur de la couche mince transparente, et elles se succèdent effectivement dans le même ordre que dans les anneaux colorés vus par transmission, ainsi que l'a observé M. E. Becquerel. Si l'on a dépassé dans l'opération le point nécessaire pour produire la couche de la couleur voulue, ou si le dépôt n'est pas convenable, on n'a, pour le faire disparaître totalement, qu'à laver la lame dans une dissolution étendue d'acide acétique, et la surface est aussi nette qu'avant l'opération et prête à recevoir une nouvelle couche de peroxyde. Il faut d'un autre côté, quand l'opération a réussi, avoir soin, après qu'elle est achevée, de laver à grande eau pour enlever la potasse qui, sans cela, réagirait sur le peroxyde et le décomposerait.

On conçoit facilement que ce mode de coloration ne peut servir que pour de petits objets si l'on veut que la teinte soit uniforme; aussi quand on veut produire des objets d'ornement de nuances différentes, on a soin d'agir sur des pièces séparées à chacune desquelles on donne une teinte uniforme, et que l'on monte ensuite toutes ensemble. Cependant on peut donner des couleurs différentes aux diverses parties d'un même objet en recouvrant d'un vernis celles de ces parties qui ne doivent pas recevoir la même couleur, pendant que les autres reçoivent le dépôt. Ainsi, je suppose qu'on ait à colorer un groupe de fleurs ciselées et gravées sur une plaque en métal, de différentes couleurs, voici comment on s'y prendra : Si la plaque n'est pas en or, on commencera par la dorer fortement après en avoir maté le fond; c'est sur ce fond mat et doré qu'on opérera la coloration. On couvrira le fond et tout ce qui doit rester couleur d'or avec un vernis, soit épargne liquide noire[1], au moyen d'un

[1] Voici la composition de cette épargne, qui peut servir dans bien des cas:

Vernis copal très-siccatif.	9 parties.
Noir de fumée.	1
	10

On dissout cette composition dans l'essence de térébenthine, que l'on chauffe avec précaution.

petit pinceau, puis on commencera l'opération. Lorsque toutes les fleurs auront la couleur rouge clair, qui est la première qui se montre, on couvrira d'épargne celles qui doivent rester de cette couleur, puis on portera le reste au violet; on couvrira d'épargne celles qui doivent être violettes, on continuera à pousser ce qui reste en couleur jusqu'au bleu que l'on couvrira également d'épargne. Il ne reste plus à la fin de découvert que les feuilles; alors on pousse la coloration jusqu'au vert qu'on peut encore nuancer, puisque le premier vert qui se montre est foncé, que si on prolonge l'opération un instant de plus, il devient plus clair et qu'il finirait par devenir jaune. Quand la pièce est ainsi colorée, on dissout le vernis dans l'essence de térébenthine à froid; on lave avec une brosse dans de l'eau de savon, puis ensuite avec de l'eau chaude, et on essuie avec un linge fin. Ces diverses couleurs, qui imitent les couleurs naturelles des fleurs et qui sont posées sur un fond or ou argent mat, ont un très-bel aspect. On comprend, du reste, qu'on peut varier beaucoup le coloris et peindre, au lieu de fleurs, des oiseaux et d'autres objets. On a, par exemple, appliqué ce procédé à la coloration des aiguilles et des vis de montres, et on les a colorées en rouge, de façon à produire un très-bel effet. Il faut seulement faire attention que les couleurs paraissant toujours moins foncées dans le bain qu'elles ne le sont en réalité, il faut sortir les objets avant qu'ils aient atteint en apparence la couleur voulue. Le seul inconvénient que présente le mode de coloration par le moyen des dépôts électro-chimiques de peroxyde, c'est sa susceptibilité à s'altérer, soit par le contact des mains humides, soit par la simple exposition prolongée à l'air. Il faut donc placer les objets ainsi colorés sous verre. Ce qu'il vaudrait le mieux serait de les recouvrir d'un vernis aussi incolore que possible qui fût sans action sur le peroxyde de plomb; mais il ne paraît pas qu'on ait encore réussi à trouver un vernis dont l'application laisse les couleurs parfaitement intactes.

§ 4. Application à la galvanoplastie.

Autant il importe dans la dorure et dans l'application des

métaux les uns sur les autres, que les dépôts soient adhérents, autant il est indispensable, dans la galvanoplastie, qu'ils le soient peu. La galvanoplastie a, en effet, pour objet d'obtenir, au moyen d'un dépôt métallique qui s'opère sur un moule en creux ou en relief servant d'électrode négatif dans une solution métallique, l'empreinte de la surface de ce moule. On comprend donc combien il est important que le dépôt puisse se détacher facilement et sans se briser. Nous verrons dans l'instant comment ce but peut être atteint; mais disons auparavant quelques mots de la découverte même de la galvanoplastie.

Deux physiciens peuvent également la réclamer comme leur appartenant, M. Spencer en Angleterre et M. Jacobi en Russie. C'est en décomposant le sulfate de cuivre et en recueillant le cuivre à l'électrode négatif que les deux physiciens observèrent que les molécules de ce métal s'agrégeaient fortement ensemble, et prenaient l'empreinte de tous les creux et reliefs qui se trouvent sur la surface de l'électrode. L'un et l'autre réussirent à reproduire en creux des monnaies, des médailles et d'autres objets en relief; tous les deux reconnurent que, pour que le dépôt réunît toutes les conditions nécessaires d'homogénéité et de solidité, il fallait toujours opérer avec une solution de sulfate de cuivre saturée. M. Spencer ne se borna pas à mouler en creux les objets en relief, mais il se servit encore des moules eux-mêmes pour obtenir des épreuves qui étaient les *fac-simile* des objets, et il appliqua son procédé à la reproduction de caractères typographiques, de planches de cuivre gravées en taille-douce, etc. M. Jacobi, tout en se livrant au même genre d'application, imagina quelques perfectionnements dans le mode d'opérer; il eut l'idée de se servir d'une pile d'un ou plusieurs couples pour décomposer le sulfate en prenant pour électrode positif une lame de même nature que le métal en dissolution, du cuivre avec le sulfate de cuivre, de façon à remplacer par le métal dissous à l'électrode positif, la portion qui disparaît de la dissolution équivalente[1]. M. Spencer et M. Jacobi ne s'étaient

[1] On sait que l'équivalence n'est jamais parfaite, ce qui tient à des causes que nous avons déjà analysées (Tome II, page 325).

d'abord servi que d'un appareil simple, dans lequel le moule était l'élément négatif d'un couple, dont une plaque de zinc, mise en communication avec le moule, était l'élément positif.

La préparation du moule est un des points importants de la galvanoplastie; il faut d'abord que sa surface soit conductrice et puisse être mise facilement en communication avec le pôle négatif d'une pile; quand le moule n'est pas fait d'une substance conductrice par elle-même, il faut recouvrir sa surface d'une couche infiniment mince qui le soit. On se sert pour cela, soit d'une poudre métallique impalpable, telle que celle d'argent, soit de la poudre de plombagine très-divisée; on applique cette dernière poudre avec un pinceau de poils un peu longs, imprégnés de la plombagine; un second pinceau plus fin et plus doux sert à enlever l'excès de plombagine et à donner un poli brillant à toutes les parties du moule. Quelquefois on commence par imprégner le moule non conducteur d'une solution de nitrate d'argent ou d'un autre sel d'argent, d'or ou de platine, qu'on réduit par les vapeurs du phosphore; ce qui détermine une couche mince continue d'argent. Enfin, dans certains cas, on applique par la pression contre le moule une feuille mince d'or ou d'autre métal qui le métallise. Les moules non conducteurs métallisés laissent en général assez facilement dégager l'objet moulé; mais lorsqu'ils sont eux-mêmes un métal, l'adhérence est quelquefois si forte, qu'on risque de briser l'objet en le détachant. M. Spencer avait remarqué que, pour éviter l'adhérence, il faut laver la surface, quand elle est bien polie, avec une faible solution alcaline, tandis que, pour obtenir une adhérence forte, il faut la décaper, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, avec un acide. On peut également se garantir contre l'adhérence en exposant la surface du moule métallique à la vapeur d'iode, comme on s'y prend pour préparer une épreuve daguerrienne, jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte jaunâtre. Il suffit même, pour éviter l'adhérence, de laisser le moule exposé quelque temps à l'air, ce qui détermine à sa surface, ou une légère couche d'oxyde, ou une simple couche d'air adhérente qui, interposée entre le moule et l'objet moulé, permet de

détacher celui-ci plus facilement. Au reste, avec un peu d'habitude, on parvient bientôt à empêcher l'adhérence, ce qui permet d'opérer les dépôts sur des moules entièrement métalliques; condition éminemment favorable pour le succès de l'opération, qui réussit toujours mieux ainsi qu'avec des moules non métalliques.

Quant à la manière de faire les moules, si on les veut en métal, on se sert ou du plomb ou des divers alliages fusibles que la chimie fournit, et quand celui qu'on a choisi est à l'état de fusion, on applique sur sa surface, avec pression, l'objet dont on veut avoir l'empreinte, jusqu'à ce que l'alliage se soit solidifié. On peut également avec une presse se procurer facilement des empreintes de médailles sur du plomb en feuille dont la surface est bien nette. S'il s'agit de moules non métalliques, il faut les faire de substances plastiques, qui ne réagissent ni sur la dissolution, ni sur le métal précipité. La cire d'Espagne ordinaire, la cire vierge reçoivent les empreintes d'une manière très-parfaite; on emploie aussi un mélange à parties égales de cire jaune et de résine, qui n'exige qu'une très-légère élévation de température pour servir de moule. Quand on fait usage du plâtre, il faut certaines précautions; il est nécessaire de le débarrasser de tout l'air qui peut être mélangé avec lui et de le recouvrir d'une couche d'huile siccative de lin ou de noix qu'on fait chauffer jusqu'à l'ébullition, afin de le sécher promptement; ce qui rend le moule imperméable au sulfate de cuivre. On prépare aussi des moules avec la stéarine; mais lorsqu'elle est pure, elle n'a pas assez de liant et risque de se fendiller; de sorte que, pour la rendre propre à l'usage dont il s'agit, il est bon de lui ajouter un ou deux dixièmes de cire [1]. Enfin on a essayé avec succès, dans

[1] Quand on veut obtenir un moule en plâtre ou en stéarine, on commence par entourer la médaille ou l'objet quelconque, dont on veut avoir le moule, d'une bande de carton très-mince ou d'un petit ruban métallique qui forme autour de l'objet à reproduire un rebord plus ou moins élevé, suivant la saillie des reliefs que présente l'original. S'il s'agit du plâtre, on le prend aussi fin que possible et on le dissout dans l'eau pour en faire une bouillie claire dont on recouvre le fond du moule avec un pinceau, de manière à pénétrer dans tous les

bien des cas, d'employer la gutta-percha à faire des moules, soit par simple pression, soit par fusion, en la mélangeant pour la faire fondre avec $\frac{1}{8}$ de son poids d'huile de lin. Ajoutons que le soufre serait une matière excellente pour avoir des empreintes délicates, s'il ne présentait pas l'inconvénient d'exercer une action sur le métal précipité.

Le moule une fois préparé, il faut, s'il est en métal, lui souder un conducteur qui puisse le mettre en communication avec la pile, et, s'il n'est pas conducteur, il faut, après l'avoir métallisé, comme nous l'avons indiqué, l'entourer sur tout son pourtour d'un anneau ou d'un fil de cuivre qu'on serre fortement et d'où part un fil conducteur qui aboutit à la pile. Il faut seulement avoir bien soin d'étendre la couche conductrice qui a servi à métalliser le moule jusqu'au cercle de cuivre, afin que le courant électrique puisse pénétrer dans cette couche par tous les points de son contour.

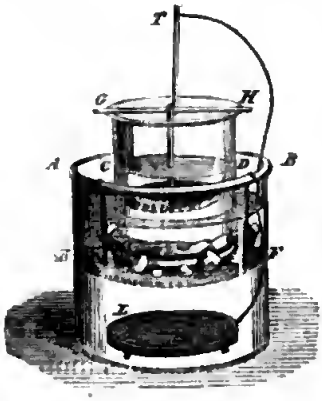


Fig. 424.

Toutes ces opérations préliminaires terminées, il s'agit d'opérer le dépôt du cuivre; on peut se servir pour cela, comme nous l'avons dit, d'un appareil simple et d'un appareil composé. L'appareil simple (fig. 424) se compose d'un bocal en verre AB, dans lequel est la dissolution de sulfate de cuivre saturée et légèrement acidulée. Un large tube de verre CD, fermé à sa partie inférieure par un diaphragme en vessie *ab*, est placé

creux du modèle; sur cette première couche de plâtre, qui a environ 2 millimètres d'épaisseur, on verse doucement le plâtre délayé jusqu'à ce que la couche totale ait l'épaisseur voulue. Alors on frappe le moule légèrement sur une table, en ayant soin de le maintenir horizontal pour faire sortir les bulles d'air qui auraient pu rester dans les creux du modèle, et on attend que le plâtre soit pris pour séparer le moule. On opère de la même manière pour les moules de stéarine; on verse la substance fondue sur la médaille, qu'on a préalablement chauffée, afin d'empêcher que cette substance ne se fige immédiatement au contact du moule. On doit également chasser les bulles d'air avec un pinceau ou par de

dans le bocal, de manière à ne plonger que dans la couche supérieure du sulfate; il est maintenu au moyen d'une petite planchette en bois EF, percée d'une ouverture centrale un peu plus petite que la section du cylindre, et qui est retenue à l'aide de crochets en fil de cuivre, qui viennent se fixer sur les bords du vase extérieur AB. On peut avec avantage se passer de cette planchette en se bornant à fixer le tube intérieur au bocal extérieur au moyen d'appendices partant du premier qui, dans ce cas, est au même niveau que le haut du bocal. On met de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique dans le cylindre CD; on y plonge un disque de zinc amalgamé, du centre duquel part un gros fil en cuivre T, qui est tenu fixe au moyen d'une baguette en verre GH, qui repose sur les bords du bocal et autour de laquelle on fait faire un tour au fil. L'objet à reproduire ou le moule est placé au fond du vase, mais il faut avoir soin que la face sur laquelle le cuivre doit être déposé soit bien horizontale et tournée en dessus; le fil conducteur qui part de l'objet est attaché au fil G, et le circuit étant ainsi fermé, la décomposition du sulfate de cuivre a lieu. A mesure qu'elle s'opère, la dissolution s'affaiblit; mais pour la maintenir au même degré de concentration, on place sur la tablette en bois EF des cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent à mesure que le liquide s'épuise. Cette précaution est importante; car, pour avoir un dépôt de cuivre compacte et adhérent, il est nécessaire que le sulfate soit très-concentré, car alors c'est le sel lui-même qui se décompose et non pas l'eau acidulée qui, au contraire, est décomposée lorsque la concentration est moindre. Or, comme nous l'avons vu [1], le dépôt de cuivre, qui résulte de la réduction de l'oxyde de cuivre par l'action de l'hydrogène naissant de l'électrolyse

légères secousses comme pour le plâtre. Il faut, avant cette opération, avoir soin d'enduire préalablement la surface du moule au moyen d'un pinceau d'une légère couche de savon, lorsqu'il s'agit du plâtre, et d'huile d'olive lorsqu'il s'agit de la cire ou de la stéarine. Quand le modèle, dont on veut prendre l'empreinte en cire ou en stéarine, est en plâtre, il faut avoir soin de le tenir humecté avec de l'eau tiède avant d'y verser et pendant qu'on y verse la composition fondue.

[1] Tome II, page 326.

de l'eau, est granuleux, et par conséquent défectueux, tandis que celui qui provient de l'électrolyse directe du sulfate est ductile et brillant. Il ne faut pas non plus conduire l'opération trop vite, car alors le cuivre serait cassant; l'expérience indique facilement à quel degré il faut aciduler l'eau pour avoir un courant de la force convenable; l'eau renfermant $\frac{1}{20}$ d'acide sulfurique est en général celle qui convient le mieux. Enfin, il faut avoir soin de couvrir d'un vernis isolant les fils ou la lame de cuivre qui entourent le moule quand il est fait d'une substance non conductrice, afin de les préserver d'un dépôt de cuivre; on remplace avec avantage la lame de cuivre par une lame de plomb qui peut se détacher plus facilement; et afin que le bourrelet de cuivre qui se forme sur ces lames ne s'oppose pas à la séparation du dépôt et du moule, on a soin de leur donner plus de largeur pour qu'elles dépassent de 1 millimètre la surface du moule.

On fait quelquefois usage de diaphragmes poreux dans les appareils simples; ainsi dans une auge remplie de sulfate de cuivre on plonge des vases poreux A et A' (fig. 425), de façon que

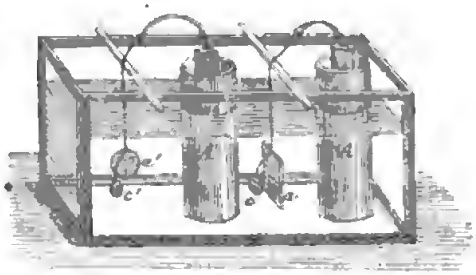


Fig. 425.

la dissolution du sulfate soit de 1 à 2 centimètres au-dessous du haut de ces vases. Dans leur intérieur on introduit de l'eau acidulée, puis un cylindre de zinc muni d'une tige de cuivre qu'on met en communication avec le fil conducteur qui part des objets *a* et *a'*, sur lesquels le cuivre doit être déposé, et dont la face tournée du côté du vase poreux est la seule qui soit conductrice; si l'objet est métallique, il faut avoir soin de recouvrir l'autre face d'un vernis isolant. Il faut prendre la précaution, quand on fait usage de moules en gutta-percha ou en toute autre ma-

tière peu pesante, de leur adapter, afin qu'ils plongent bien au milieu de la dissolution, des contre-poids *c* et *c'* en cuivre recouverts de vernis, ce qui fait que le cuivre ne s'y dépose pas. Cette disposition a l'avantage de permettre de placer dans la même dissolution plusieurs appareils simples; mais elle a d'un autre côté l'inconvénient d'obliger de mettre les moules verticalement, ce qui empêche le dépôt d'être aussi homogène et uniforme que lorsqu'ils sont horizontaux. Il se produit alors des stries et des inégalités d'épaisseur qui tiennent aux courants verticaux qui s'établissent dans le liquide quand sa densité varie, comme c'est le cas ici, à mesure que la décomposition s'opère.

Les appareils simples ont un inconvénient, c'est l'endosmose qui s'opère nécessairement à travers le diaphragme qui sépare l'eau acidulée de la dissolution de sulfate de cuivre. Il en résulte, au bout d'un certain temps, la présence dans cette dissolution d'un peu de sulfate de zinc, ce qui oblige à la renouveler; petit inconvénient, il est vrai, à côté des avantages et de la simplicité de ce genre d'appareil. Les appareils composés n'ont pas cet inconvénient, puisque la production de l'électricité a lieu en dehors de la dissolution du sulfate de cuivre qui est décomposée; c'est dans ce cas qu'on peut employer un électrode positif en cuivre qu'on nomme un électrode soluble, parce que, comme nous l'avons dit, il se dissout à mesure que le sulfate de cuivre est décomposé, de manière à remplacer dans la dissolution le cuivre déposé à l'électrode négatif. Cette dissolution est

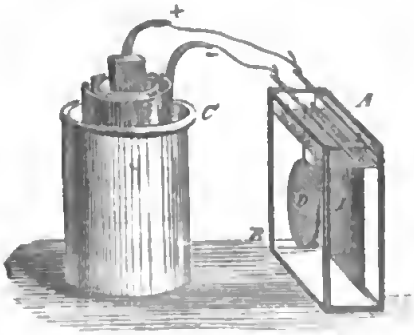


Fig. 426.

placée dans un vase A B (fig. 426), dans lequel plonge la pièce D, sur laquelle le cuivre doit être déposé, et qui communique

avec le pôle négatif d'un couple C, dont le pôle positif aboutit à une lame L de cuivre qui se dissout; au lieu d'un couple on peut en avoir plusieurs disposés en série; cela dépend de la grandeur et de la nature des dépôts qu'on veut opérer; quand il s'agit de reproduire des médailles ou objets du même genre, un seul couple est suffisant. On peut disposer, si l'on veut, le moule horizontalement pour éviter les inconvénients de la disposition verticale; mais dans les cas assez nombreux où cela n'est pas nécessaire, on peut alors opérer plusieurs dépôts à la fois en plaçant dans une cuve remplie de sulfate de cuivre (fig. 427) une large lame de cuivre LL qui occupe le milieu de la cuve et

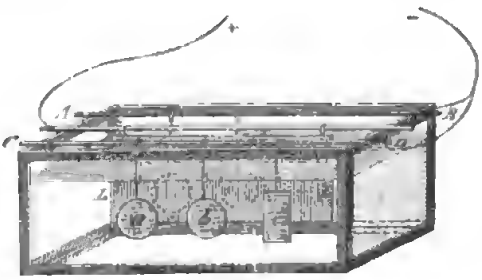


Fig. 427.

qui communique avec le pôle positif de la pile, tandis que de chaque côté de cette lame sont suspendus à deux tiges de cuivre en relation avec le pôle négatif des moules préparés *a*, *b*, *c*.

Ajoutons encore que la beauté du dépôt dépend non-seulement, comme on l'a vu, de l'intensité du courant et du degré de concentration de la dissolution, mais de la pureté du sulfate de cuivre, qu'il faut choisir exempt du sulfate de fer qui se trouve quelquefois mélangé avec lui; quand le sulfate est en beaux cristaux, on est sûr de sa pureté. On peut employer d'autres sels et, entre autres, le nitrate et l'acétate; mais soit à cause de son prix moins élevé, soit à cause de la facilité de sa manutention, on préfère généralement le sulfate.

Nous ne nous arrêterons pas aux essais qu'on a tentés pour déposer par la galvanoplastie d'autres métaux que le cuivre. Ces essais, en général, n'ont pas été très-heureux. L'or et l'argent cependant ont donné de bons résultats. On se sert pour l'or des mêmes dissolutions que pour le dorage; il va sans dire qu'il

faut employer les appareils composés et prendre une lame d'or pour électrode positif. Quant à l'argent, on a fait également usage avec avantage de la dissolution du cyanure double de potassium et d'argent employé dans l'argenture; la dissolution saturée de sulfate est aussi employée ainsi que celle du nitrate; mais il faut, avec cette dernière dissolution, que le courant soit très-faible. Il est nécessaire, quand on fait la galvanoplastie de l'argent, de métalliser les moules avec la poudre d'argent, au lieu d'employer la plombagine.

C'est, comme nous l'avons dit, la galvanoplastie du cuivre qui a surtout pris rang dans l'industrie et qui a fourni de nombreuses applications du plus grand intérêt, que nous allons rapidement parcourir. Nous insisterons seulement préalablement sur la facilité et la délicatesse avec lesquelles le dépôt de cuivre bien opéré reproduit, jusqu'aux plus petits détails, toutes les parties d'un moule, et si au lieu de déposer le métal sur un moule, on le reçoit sur une lame de métal, d'argent par exemple, extrêmement bien polie, on obtient une lame de cuivre dont la surface, en contact avec celle de l'argent, a un poli tel, qu'il serait impossible de l'obtenir aussi parfait par les moyens mécaniques ordinaires. Aussi a-t-on profité de cette propriété pour fabriquer le plaqué d'argent qui sert aux épreuves daguerriennes. M. Belfield, qui a eu cette idée, commence par déposer, par voie électro-chimique sur une plaque de laiton parfaitement polie, une couche d'argent pur, homogène et uniforme, dont on varie à volonté l'épaisseur; puis sur cette couche d'argent il en précipite une autre de cuivre. Lorsque celle-ci a acquis l'épaisseur suffisante pour offrir une résistance convenable, on détache la plaque double de la plaque de laiton sur laquelle elle a été formée; opération délicate et pour laquelle il faut beaucoup de soin. On a ainsi une plaque de cuivre recouverte d'une couche d'argent parfaitement polie et propre au daguerréotype. Ce procédé ne paraît pas convenir, soit sous le rapport économique, soit à cause des difficultés d'exécution, à la fabrication du plaqué en général.

La principale des applications de la galvanoplastie est sans aucun doute la reproduction des médailles ainsi que celle des

bas-reliefs, des bustes, des statues et de tous les objets de l'art du sculpteur et du fondeur. Nous avons déjà exposé en détail la manière d'obtenir cette reproduction lorsqu'il s'agit de médailles, en opérant, soit sur la médaille elle-même qui, servant d'électrode négatif, donne en creux un modèle qu'on met de nouveau en expérience pour avoir l'image en relief, soit, si on craint d'altérer le modèle, sur l'empreinte de la médaille prise par les moyens et avec les précautions que nous avons indiquées. On obtient ainsi des spécimens de la médaille tellement parfaits qu'il est souvent difficile de les distinguer de l'original. On peut en outre les bronzer, les argenter ou les dorer suivant les procédés indiqués. Lorsqu'il s'agit de la reproduction d'un objet de sculpture, il est rare qu'on puisse l'obtenir d'une seule pièce, sauf dans le cas où il s'agirait d'une statuette de très-petite dimension. En général on prend les moules en creux des différentes parties du modèle, puis on les revêt intérieurement de plombagine et on les réunit ensemble avec de la cire ou du plâtre rendu imperméable, de manière à former une espèce de vase creux propre à recevoir la dissolution. Il faut faire usage ici d'une forte pile et d'une solution peu concentrée pour que le courant s'y dissémine également partout, et donner par cette même raison à la pièce de cuivre qui sert d'électrode positif une étendue aussi grande que possible.

Quand on a obtenu les diverses pièces galvanoplastiques du modèle, il faut les souder ensemble, ce qu'on peut faire en faisant une soudure à l'argent ou à l'étain, qu'on recouvre ensuite d'une couche de cuivre. C'est ce moyen qu'on a été obligé d'employer pour réunir ensemble les deux faces d'une médaille, qui ne peuvent être naturellement reproduites que séparément. La galvanoplastie, lorsqu'elle est appliquée à la reproduction d'objets de sculpture d'une dimension considérable, exige le concours de l'art du fondeur, soit pour opérer convenablement la réunion des pièces, soit pour la fabrication de certaines parties que la galvanoplastie est impuissante à produire convenablement. C'est sur cette base qu'était fondé le grand établissement du duc de Leuchtemberg à Saint-Pétersbourg, dans lequel on se proposait de reproduire des statues

colossales. Quoique le but qu'on avait en vue ait été atteint, il paraîtrait cependant que les résultats n'ont pas été aussi satisfaisants qu'on l'espérait. Le prix élevé de ce mode de fabrication, lorsqu'on opère sur une grande échelle, est l'une des principales causes qui l'ont fait abandonner; mais il y a plus, il paraîtrait que les produits de la galvanoplastie ne sont pas susceptibles de résister, à beaucoup près, aussi bien que ceux du fondeur aux injures du temps; ce qui tient probablement à ce que l'agrégation des particules de cuivre se fait moins bien à froid qu'à chaud. Toutefois, la galvanoplastie a reproduit déjà un très-grand nombre de chefs-d'œuvre de la statuaire et de la sculpture, des bustes, des statues en pied de grandeur naturelle et même de plus de dix pieds de haut, une foule de bas-reliefs et autres objets sculptés, qui ont été l'objet de l'admiration dans l'Exposition universelle de 1855; mais il me paraît difficile qu'elle remplace l'art du fondeur pour les grands monuments artistiques destinés à figurer en plein air. Ces divers objets sont en cuivre, quoiqu'on ait fabriqué des bas-reliefs en argent; mais on peut, ce qui revient au même pour l'apparence, et c'est bien plus économique[1], recouvrir, au moyen de la pile, les ouvrages en cuivre d'un plaqué en argent, qui réussit extrêmement bien. Quand on préfère laisser le cuivre à nu, il convient, dans bien des cas, de lui donner une couleur de bronze, qui fait en général meilleur effet que la couleur du cuivre réduit par la pile.

Le bronzage s'opère de différentes manières, dont la plus simple consiste à frotter le cuivre avec de la plombagine; puis

[1] M. Figuier, dans son ouvrage intéressant *sur les découvertes scientifiques*, remarque avec raison que dans l'intérêt de l'art et de la conservation des beaux ouvrages qui lui sont dus, il est bien préférable que la matière employée ne soit pas d'un prix trop élevé. L'artiste peut ainsi multiplier beaucoup plus les produits de son imagination, n'étant pas arrêté par la forte dépense qui résulte pour lui de l'emploi des métaux précieux, de l'argent par exemple; et d'un autre côté, les chefs-d'œuvre ne risqueront plus, comme cela se voit trop souvent en temps de révolution, d'être réduits en lingots. Aussi remarque-t-on que toutes les œuvres sculpturales exécutées en bronze dans les deux derniers siècles nous ont été conservées, tandis que celles en argent, dont il y avait un assez grand nombre, ont presque totalement disparu.

on le met sur le feu pour le chauffer légèrement. Une très-faible solution d'ammoniaque ou de sulfate de potasse donne aussi au cuivre une belle couleur bronze. On parvient à obtenir une teinte de bronze florentin fort belle en chauffant simplement l'objet en cuivre, par exemple une médaille, jusqu'à une certaine température; il faut avoir soin seulement que le chauffage se fasse également sur tous les points, afin que l'oxydation, qui est la cause du phénomène, soit uniforme sur toute la surface.

De la même manière qu'on reproduit des médailles, on peut avec la galvanoplastie reproduire des cadrans de montres plus ou moins ciselés ou ornés; il faut pour cela se servir d'un cadran modèle, qu'il est préférable d'avoir en or ou en argent, parce que ces métaux sont ceux sur lesquels on obtient le plus beau guilloché sans nuances et qui se coupent le mieux sous le burin du graveur; on peut également fabriquer ainsi les fonds de boîtes de montres. Nous ne pourrions, sans nous étendre outre mesure, énumérer toutes les formes d'application qu'offre la galvanoplastie; mais, si nous ne pouvons entrer dans tous ces détails, il nous sera permis de citer M. Boquillon, comme étant une des personnes qui ont le plus contribué à perfectionner cet art nouveau par divers procédés pratiques qu'il a imaginés.

Au lieu de reproduire, au moyen d'un moule, des objets d'art, on peut vouloir seulement les recouvrir d'une couche de cuivre, pour leur donner un air massif et leur permettre de résister à l'action de l'air et de l'humidité. Tel est par exemple le cas pour de petites statuettes et autres ouvrages modelés en plâtre; il faut commencer par rendre leur surface conductrice à l'aide de la plombagine ou d'une poudre métallique; puis on les plonge dans l'un des appareils que nous avons décrits. Afin d'obtenir que l'épaisseur du dépôt soit uniforme, ce qui est essentiel pour conserver aux différentes parties en relief de l'objet leurs proportions relatives, on doit chercher à donner à la lame de cuivre qui sert d'électrode positif une forme aussi analogue que possible à celle que présenterait une empreinte prise sur le modèle. Diverses autres précautions sont

nécessaires quand l'objet est d'une dimension considérable, comme par exemple de procéder par des opérations successives en recouvrant d'un vernis isolant les parties où l'épaisseur de la couche de cuivre est suffisante pour augmenter cette épaisseur dans les autres. Quand il s'agit de recouvrir de cuivre des insectes, des fruits, il suffit de les enduire de plombagine et d'enfoncer quelque part une épingle, qui sert à établir la communication avec le pôle négatif de la pile.

L'une des plus importantes et les plus élégantes applications de la galvanoplastie est celle qui concerne ce qu'on peut nommer l'électrotypie, c'est-à-dire la reproduction de planches destinées à la gravure ou à l'impression. M. Spencer, comme nous l'avons dit, s'était beaucoup occupé de cet objet, et l'identité parfaite des empreintes obtenues ainsi avec les modèles jusqu'au point que les lignes les plus délicates, même celles qui ne sont visibles qu'au microscope, étaient reproduites, avait fait penser que ce procédé serait précieux pour la reproduction des planches gravées en cuivre et en acier. Le dessin gravé étant en creux, il faut commencer par obtenir un moule en relief, avec lequel on se procure un moule en creux semblable à l'original. Pour éviter, ce qui est assez difficile, l'adhérence entre l'original et le moule en relief, on peut employer divers moyens, tels que de recouvrir sa surface d'une pellicule mince d'un corps gras ou de cire en la frottant à chaud avec ces corps, tels que de placer la plaque dans un lieu frais pendant vingt-quatre heures, ce qui détermine la formation d'une couche d'air assez forte pour empêcher l'adhérence. M. Mathiot des États-Unis a proposé d'employer la vapeur d'iode, dont nous avons déjà vu l'efficacité dans ce cas; mais alors, pour que son effet soit uniforme et s'exerce également sur toutes les parties de la planche gravée, il faut commencer par argenter celle-ci. Pour préparer ses plus grandes planches de 10 pieds carrés de surface, M. Mathiot emploie la dissolution d'un grain (0g,065) d'iode dans 20,000 grains d'alcool concentré. La délicatesse des traits de la plaque est si peu diminuée par l'emploi de ce moyen chimique de prévenir l'adhérence, que M. Mathiot a pu électrotyper sept fois en relief et en creux

successivement une même planche gravée, sans qu'on ait pu apercevoir la moindre différence entre la dernière reproduction et l'original. Les grandes cartes des côtes de l'Amérique ont été reproduites, par ce procédé électrotypique. Il faut dans ces opérations, avoir soin de placer les planches horizontalement et d'opérer lentement, afin d'obtenir un dépôt de cuivre suffisamment compacte et dur. Si les planches sont en acier, comme elles ne peuvent être plongées dans aucune des dissolutions de cuivre sans être attaquées, on doit obtenir la première épreuve en argent, et alors on peut avoir la contre-épreuve en cuivre; mais le résultat de cette manière d'opérer n'est pas toujours satisfaisant.

Quoique la reproduction d'une planche par le dépôt direct du cuivre soit le mode qui paraisse donner les meilleurs résultats, cependant il est des cas, et en particulier lorsqu'il s'agit de planches d'acier, où il est préférable de se procurer un moule en prenant l'empreinte de la planche gravée avec de la cire ou de la gutta-percha, ou mieux encore avec une lame de plomb bien décapée. A cet effet, on place cette lame dans une presse à imprimer en taille-douce au-dessus de la planche gravée, et on la recouvre d'une plaque de fer.

On peut également reproduire des planches gravées sur bois, et pour cela on commence par prendre une copie en creux en recouvrant la surface supérieure de la planche d'une couche de plombagine, et sa surface inférieure ainsi que ses côtés avec de la cire ou de la graisse, pour empêcher l'absorption. Ce procédé est précieux pour multiplier en cuivre les gravures sur bois, les vignettes et les ornements divers qu'on emploie dans l'imprimerie, et qui sont connus sous le nom de *clichés*.

Tous les procédés que nous venons de décrire, et d'autres encore analogues sur lesquels il serait inutile d'insister, consistent à faire déposer du cuivre galvanoplastiquement, soit sur des planches gravées en creux pour avoir des contre-épreuves en relief sur lesquelles on opère un second dépôt qui donne une planche semblable à l'original, soit directement sur des moules en relief préparés par les moyens indiqués.

Il nous reste à parler de quelques modes de reproduction des

dessins qui donnent de beaux résultats. Ainsi M. le duc de Leuchtemberg a eu l'idée de remplacer l'encre d'imprimerie, avec laquelle on couvre la planche de cuivre dont on veut avoir une copie, par un mélange de résine de Damara, de rouge de fer et d'essence de térébenthine, et avec lequel il fait tirer une épreuve sur papier très-mince. Cette épreuve encore fraîche est appliquée sur une planche de cuivre ou d'argent poli, de sorte que le dessin touche à la plaque; et, après la dessiccation, on enlève le papier au moyen de l'eau, pour ne laisser que le dessin marqué à l'encre sur la surface du cuivre. En reproduisant cette planche par le procédé électrotypique, on obtient une planche en creux propre au tirage sous la presse en taille-douce.

C'est sur un principe semblable que repose le plus remarquable sans contredit des procédés électrotypiques, auquel M. de Kobell de Munich, son inventeur, a donné le nom de *galvanographie*. On fait au lavis, sur une plaque de cuivre argentée, le dessin qu'on veut reproduire avec une couleur unique, telle que de l'encre un peu épaisse, ou mieux encore avec une couleur à l'encaustique préparée au moyen d'une dissolution de cire dans l'essence de térébenthine ou dans du baume de copahu [1]. On peut aussi se servir simplement d'une couleur composée avec du crayon lithographique de l'espèce la plus dure, pulvérisé et délayé dans de l'eau distillée. Les tons forts sont donnés par les plus grandes épaisseurs de couleurs, les demi-teintes par les épaisseurs moindres, et les lumières par l'absence de toute couleur; c'est ainsi que l'on forme des dessins. Sans nous arrêter à divers détails relatifs à la manière de perfectionner le dessin de façon à obtenir les clairs et les ombres ainsi que leurs diverses nuances, nous nous bornerons à ajouter que c'est sur ce dessin qu'on dépose par la galvanoplastie une couche de cuivre assez épaisse pour former une planche capable de résister à la pression, et qui présente en creux tous les traits depuis les plus forts jusqu'aux plus fins, ce qui la rend apte à servir pour la gravure.

[1] M. de Kobell s'est aussi servi avec succès d'une couleur composée d'essence de térébenthine, tenant en dissolution de la résine de Damara et colorée avec du peroxyde de fer.

On peut encore, au lieu de faire un dessin sur une planche en cuivre, y appliquer mécaniquement l'objet même qu'on veut reproduire, après avoir eu soin de l'enduire d'un mélange de térébenthine et d'esprit-de-vin, pour le fixer et l'étendre mieux sur la planche. On place au-dessus une lame de plomb pur et décapé, et on presse le tout; ce corps laisse une empreinte en creux sur le plomb; on dépose alors sur cette lame, par voie galvanoplastique, une plaque de cuivre qui produit en relief l'objet pressé; et si l'on fait un second dépôt sur cette plaque, on a une planche de cuivre en creux propre à donner à l'impression une épreuve de l'objet. C'est par ce procédé que MM. Auer et Worring, à Vienne, ont reproduit avec une exactitude et une vérité frappantes des objets de toute nature, des dentelles, des broderies, des fleurs, des feuilles d'arbre, des plantes entières, des fossiles, des insectes, etc. Tous ces objets sont reproduits avec leurs couleurs et leur relief naturel, ou simplement en noir. Il faut une grande habileté pour bien encrer les planches lorsqu'il s'agit de les imprimer en plusieurs couleurs. On peut se servir de la première planche en cuivre qu'on obtient et qui est en relief, sans avoir besoin de recourir à la contre-épreuve en creux. Seulement, pour l'imprimer, on pose la couleur au moyen du rouleau à encrer, au lieu de la frotter dans les profondeurs, comme cela se pratique pour celle en creux.

L'exactitude et la délicatesse avec lesquelles la couche galvanoplastique reproduit les moindres détails de la planche sur laquelle on la dépose, ont fait penser à M. Fizeau qu'on pouvait obtenir une gravure des épreuves daguerriennes en déposant du cuivre sur la surface de la plaque où se trouve l'image. On trouve en effet sur le cuivre une image semblable à celle de l'original, mais symétrique comme si elle était vue dans un miroir. Cet effet est dû à ce que sur la plaque daguerrienne les ombres sont formées par les parties polies de la plaque, et les clairs par les parties mates; or, la surface de la plaque galvanoplastique se trouve aussi polie là où elle correspond au poli de la plaque daguerrienne, et mate là où cette plaque est mate. Seulement, pour éviter l'adhérence du cuivre à

la plaque daguerrienne, il est nécessaire de fixer au chlorure d'or l'image positive déposée sur la plaque. Ce procédé, qui équivaut au dépôt d'une couche d'or infiniment mince sur l'épreuve daguerrienne, permet de plonger celle-ci impunément dans le bain de sulfate de cuivre.

M. Grove a cherché à transformer d'une manière immédiate les plaques daguerriennes en planches gravées; mais alors ce n'est plus en faisant déposer sur leur surface une couche de cuivre galvanoplastique, mais en plaçant au contraire la plaque daguerrienne au pôle positif d'une pile voltaïque dans des dissolutions qui attaquent l'argent et non le mercure. Après beaucoup d'essais faits conjointement avec M. Gassiot, M. Grove a trouvé que la dissolution la meilleure était un mélange d'un volume d'eau distillée et de deux volumes d'acide hydrochlorique. Ces deux physiciens placent la plaque dans une auge remplie de cet acide en y plongeant parallèlement une lame de platine de même dimension, qui sert d'électrode négatif et qu'on a soin de platiniser, pour empêcher que l'hydrogène n'adhère sur un point quelconque de sa surface, ce qui ferait que la partie correspondante de la plaque daguerrienne éprouverait une moindre action. Il faut avoir soin de vernir avec une solution de gomme laque le dos et les bords de la plaque daguerrienne. Quand on enlève la plaque et qu'on l'a lavée avec de l'eau distillée, on trouve qu'elle présente un beau dessin, couleur de terre de Sienne, de l'image originale; effet qui provient de ce que le chlore qui se dégage de sa surface, en attaquant les parties de cette plaque où l'argent est à nu, produit un sous-chlorure de couleur foncée. Pour le faire disparaître, on plonge la plaque dans une solution très-faible d'ammoniaque, et on frotte doucement la surface avec du coton très-mou jusqu'à ce que le dépôt soit dissous; on lave ensuite et on sèche avec soin. On a alors une planche qui représente la gravure parfaite du dessin original, et qui donne par conséquent une image positive. Seulement il faut beaucoup de précautions si l'on veut, pour avoir une bonne impression, obtenir une gravure suffisamment profonde et qui pourtant ne le soit pas assez pour que les lignes empiètent les unes sur les autres, ce qui altérerait la beauté

des images. Ce n'est que par une longue expérience et après quelques tâtonnements que MM. Grove et Gassiot sont parvenus à déterminer la quantité et l'intensité du courant, la distance entre les deux plaques servant d'électrodes, et enfin la durée de l'opération, les plus propres à assurer le succès du résultat. Un couple de Grove, comme source d'électricité, 5 millimètres de distance entre les deux plaques, 25 à 30 secondes pour la durée de l'opération, quitte à replonger encore la plaque quelques secondes si ce temps n'a pas suffi, telles sont les données qui résultent des recherches des deux physiciens. Ajoutons que les planches gravées ainsi sont d'une telle finesse, qu'elles résistent difficilement à l'action de la presse, ce qui fait que le nombre des épreuves qu'on peut en tirer est très-limité.

M. Smee a eu aussi l'idée de placer au pôle positif d'une pile formée de 1 à 2 couples, et de plonger dans une solution de sulfate de cuivre, une planche de cuivre recouverte d'une couche de vernis destinée à la gravure à l'eau-forte, remplaçant ainsi par l'action de l'oxygène et de l'acide dégagés à sa surface, celle de l'acide nitrique étendu sur le cuivre mis à nu avec la pointe fine. Il faut avoir soin que la plaque qui sert d'électrode négatif ne soit pas plus grande que la positive. On peut, avec quelques précautions, déterminer par ce mode de gravure des traits plus ou moins profonds, ce qui fait qu'on obtient très-facilement des gradations du clair à l'obscur. M. Walker, qui s'est beaucoup occupé des questions relatives à la galvanographie, art dans lequel il a introduit plusieurs perfectionnements de détail, avait imaginé, pour obtenir une bonne gravure, de déposer sur une plaque en cuivre, préalablement trempée dans l'acide nitrique étendu, une épreuve toute fraîche d'une planche gravée; au moyen de la presse, on détermine le transport de l'encre de l'épreuve sur la planche de cuivre. Puis on dore légèrement cette planche avec le courant électrique; l'or ne se dépose pas sur les parties revêtues d'encre, mais seulement sur le cuivre; on lave avec l'essence de térébenthine, qui dissout l'encre grasse et met à nu le cuivre dans tous les points que recouvrait cette encre. On place alors dans le sulfate de cuivre

la planche ainsi préparée en la faisant communiquer au pôle positif, et on obtient de cette manière une gravure excellente.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre.

Grotthus. — Végétations métalliques. — *Annales de ch.* T. LXIII, p. 5.

Buchotz. — *Idem.* — *Annales de ch.* T. LXVI, p. 226.

Fischer. — *Idem.* — *Ann. der physik*, 1835.

Bunzen. — Préparation des métaux par voie galvanique. — *Ann. der physik* (1854). T. XCII, p. 648. — *Annales de ch. et de phys.* (N. S). T. XLI, p. 354.

Matthiessen. — *Idem.* — *Annales de ch. et de phys.* (N. S.). T. XLV, p. 347.

Deville. — Préparation de l'aluminium. — *Annales de ch. et de phys.* (N. S.) T. XLIII, p. 33, et t. XLVI, p. 415.

Davy. — Préservation du doublage des vaisseaux. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXVI, p. 84, et t. XXIX, p. 187.

Van-Beck. — Préservation du fer. — *Idem.* T. LXIV, p. 225.

Munck. — *Idem.* (*Bibl. univ.*). T. XXIII, p. 188.

Schoenbein. — *Idem* (*Bibl. univ.*) (1840). T. XIII, p. 164.

De la Rive. — Nouveau procédé de dorage. — *Annales de ch. et de phys.* T. LXXIII, p. 398, et *Bibl. univ.* (1840). T. XIII. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 615.

Elkington. — Procédés de dorage. — *Comptes rendus de l'Acad. des Sc. du 29 novembre* 1841, et *Arch. de l'electricité.* T. II, p. 111.

Ruolz. — Dorage et application des métaux. — *Idem.*

Berthier. — Couleur de l'or. — *Annales de ch. et de phys.* T. LIX, p. 337.

Oersted. — Essai des métaux par voie électro-chimique. — *Idem.* T. XXXIX, p. 274.

Jacobi. — Application de l'électro-métallurgie aux arts, et instruction pour la galvanoplastie. — *Arch. de l'électricité.* T. II, p. 452, t. IV, p. 501, et t. V, p. 184.

Spencer. — Gravure des planches de cuivre. — *Bibl. univ.* (1843). T. XXIII, p. 417.

Kobell. — Galvanographie. — *Bibl. univ.* (1845). T. XXX, p. 212, et *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 584.

Grove. — Gravure voltaïque des plaques daguerriennes. — *Arch. de l'électricité.* T. II, p. 457.

Becquerel. — Traitement des minerais par voie électro-chimique. — Dorage et application des métaux. — Application des oxydes. — Coloration des métaux. — *Annales de ch. et de phys.*, et *Arch. de l'électricité, passim.* — *Traité d'électricité et de magnétisme.* T. II (1855).

Fizeau. — Gravure électro-photographique. — *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 498.

CHAPITRE III.

APPLICATIONS PHYSIOLOGIQUES, SOIT THÉRAPEUTIQUES.

§ I. Coup d'œil général sur l'application de l'électricité à l'art de guérir, et description des appareils employés.

L'effet que produit sur tout corps organisé, et en particulier sur le corps humain, une décharge électrique, fut, parmi les phénomènes qui sont dus à l'électricité, un de ceux qui attirèrent le plus vite l'attention des savants immédiatement après la découverte de la machine électrique et de la bouteille de Leyde. Ainsi, dès l'année 1748, Jallabert à Genève eut l'idée de soumettre quelques malades à un traitement électrique en tirant des étincelles des différentes parties de leur corps, qu'il approchait du conducteur d'une machine électrique. Il crut reconnaître que l'électrisation activait la circulation du sang, qu'elle était capable de réveiller la sensation endormie et de rappeler au mouvement un organe paralysé, et qu'elle déterminait des mouvements convulsifs involontaires. Il réussit, sinon à guérir, du moins à améliorer considérablement l'état d'un homme qui avait le bras droit paralysé, surtout du sentiment, et dont la main et l'avant-bras étaient atrophiés, en l'électrisant soit par étincelles, soit aussi par de fortes commotions. Plus tard, l'abbé Sans et Sigaud de la Fond obtinrent un assez grand nombre de cas de guérisons de paralysies plus ou moins complètes. En 1781, Mauduyt publia plusieurs observations, desquelles il concluait que l'application de l'électricité était favorable dans les paralysies et dans tous les cas où il convient de fluidifier les liquides et de donner du ton aux solides. Il

appliquait en général l'électricité sous forme de bain électrique, c'est-à-dire en plaçant le patient sur un tabouret isolant et en le mettant en communication avec le conducteur d'une machine électrique. L'effet, s'il y en avait réellement un, ne pouvait provenir que de l'écoulement de l'électricité dans l'air. Aussi a-t-on dès lors, dans ce mode de traitement, tiré des étincelles des différentes parties du corps de celui qu'on veut électriser en en approchant des conducteurs métalliques non isolés, ou simplement la main de l'opérateur, ou encore des brosses formées de nombreux fils métalliques, pour faire sortir l'électricité de plus de points à la fois. C'est surtout pour guérir les paralysies qu'on appliquait ce mode d'électrisation. L'abbé Bertholon, Mazars de Cazelles à Toulouse, Cavallo en Angleterre, et bien d'autres auteurs, citent un assez grand nombre de cas de guérisons opérées par l'électricité, mais bien des cas d'insuccès également. Toutefois, ce qui frappe dans ces travaux, et en particulier dans ceux de Bertholon, ce sont les fausses idées théoriques sur lesquelles on s'appuyait. Le fait est que, loin de se généraliser, l'application médicale de l'électricité était tous les jours plus abandonnée, jusqu'au moment où l'on essaya de l'employer sous forme de courant produit par la pile voltaïque. Mais, avant de passer à ce nouveau mode d'application, nous devons ajouter qu'on avait essayé de se servir de l'électricité condensée, telle qu'elle se trouve par exemple dans une bouteille de Leyde, en faisant passer la décharge à travers une partie du corps. Ces commotions très-fortes ne sont pas innocentes; elles peuvent faire assez de mal en ébranlant tout le système nerveux, comme aussi dans quelques cas on les a vu produire des guérisons remarquables. Ce genre d'action est en diminutif semblable à celui de la foudre, dont la chute est le plus souvent mortelle pour celui qui y est exposé, mais qu'on a vu quelquefois, quoique rarement, produire la guérison de paralysies invétérées. Nous reviendrons sur les effets mêmes de la foudre quand nous nous occuperons de l'influence de l'électricité atmosphérique sur l'organisme vivant. Remarquons seulement que M. Thillaye donna en 1803 un assez grand nombre de préceptes utiles sur l'application médicale de l'électricité

ordinaire; préceptes qui sont suivis encore aujourd'hui, et qui sont extrêmement simples, tels que se servir de brosses métalliques tenues par un manche isolant et mises en communication avec le conducteur de la machine; donner d'abord l'électricité la plus faible, et l'augmenter graduellement jusqu'à la dose que le malade peut supporter; ne pas empêcher, quand on applique l'électrisation, l'emploi d'autres procédés agissant dans le même sens, tels que frictions, vésicatoires, purgatifs, etc.

L'idée d'appliquer le galvanisme, soit l'électricité de la pile, à la thérapeutique, doit remonter jusqu'aux expériences si remarquables de M. de Humboldt sur l'irritation galvanique des fibres musculaires et nerveuses. Mais Aldini, élève de Galvani, est le premier qui se soit occupé directement de l'application du galvanisme à la médecine, à laquelle il consacra la plus grande partie de son ouvrage, publié à Bologne en 1804, sous le titre d'*Essai théorique et expérimental sur le galvanisme*. Galvani avait déjà, il est vrai, dans ses importantes recherches électro-physiologiques, entrevu ce genre d'applications, mais il n'en avait pas poursuivi la réalisation. On trouve dans les travaux d'Aldini, au milieu d'idées théoriques inadmissibles, un assez grand nombre de faits curieux sur les effets de l'électricité dans les nombreux cas pathologiques où l'auteur l'avait appliquée; néanmoins, il n'en résulta pas qu'elle pût prendre rang dans les moyens curatifs généralement adoptés; toutefois, les essais continuèrent. Sarlandières se servit, pour introduire le courant plus sûrement dans l'intérieur du corps, de l'acupuncture, dans le traitement de la goutte, du rhumatisme et des affections nerveuses; il énonça également le premier l'idée, qui fut mise à exécution par Pétrequin, d'employer ce moyen pour le traitement des anévrismes. Deux ou plusieurs aiguilles fines d'acier ou de platine, plantées à travers la tumeur anévrismale, sont mises en rapport avec les deux pôles d'une pile, ce qui produit la coagulation du sang contenu dans la dilatation artérielle qui caractérise l'anévrisme, et par suite la guérison. Cet effet, qui est plutôt un résultat indirect de l'action du courant électrique, puisqu'il dépend de ses propriétés chimiques et non de ses propriétés physiologiques, est du même

genre que l'application du courant au traitement des calculs vésicaux imaginé par Prevost et Dumas; nous nous en occuperons d'une manière spéciale dans le paragraphe que nous consacrons à l'action thérapeutique indirecte de l'électricité.

Nous ne pouvons nous arrêter sur les nombreuses publications où l'on préconisait l'électricité comme moyen curatif. En 1828, Fabré-Palaprat publia une traduction d'un ouvrage de Labaume, précédé d'une préface dans laquelle le traducteur rivalise avec l'auteur sur les merveilleux effets de l'électricité, qui, suivant eux, est un remède souverain pour presque toutes les maladies. Cependant Labaume admet qu'il ne faut pas employer le galvanisme pour les maladies inflammatoires aiguës et les excitations nerveuses; d'un autre côté, Fabré-Palaprat dit avoir réussi à se guérir d'une maladie nerveuse dont il était atteint depuis plusieurs années, en introduisant une aiguille successivement des deux côtés du crâne dans la région du cervelet sur l'os même, et une autre aiguille dans une partie adjacente. Les deux aiguilles ayant été mises en communication avec les pôles d'une pile, on électrisa par commotion, c'est-à-dire en interrompant le circuit à des instants très-rapprochés, le courant étant dirigé tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, et, au bout de plusieurs mois de ce traitement, la guérison fut complète. Magendie a aussi constaté l'heureuse influence de l'électricité voltaïque dans plusieurs affections nerveuses, et en particulier dans celles de l'organe de la vue; ses expériences assez nombreuses ont donné dans bien des cas des résultats favorables; il a reconnu que l'électricité voltaïque agit spécialement dans les névralgies, surtout quand on fait passer le courant dans le trajet du nerf malade.

C'est dans les cas de paralysie en général que l'application de l'électricité voltaïque semble avoir donné les résultats les plus satisfaisants. Un physicien italien, que nous avons déjà eu l'occasion de nommer plus d'une fois, M. Marianini, cite, dans un mémoire publié en 1833, un nombre assez considérable de cas de paralysie traités au moyen de l'électricité voltaïque. Il fait usage de piles ordinaires, cuivre et zinc, à colonne, chargées simplement avec des rondelles de drap humectées d'eau salée,

et composées d'un nombre plus ou moins considérable de couples (50 à 100), suivant les circonstances. Pour donner une idée de la manière dont il opère, nous citerons le cas d'une jeune femme de 23 ans dont les deux jambes, privées de mouvement, n'éprouvaient plus aucune sensation depuis l'extrémité des orteils jusqu'aux genoux, quel que fût l'objet avec lequel on les touchât, qu'il fût chaud ou froid, pointu ou tranchant. M. Marianini fit d'abord donner 150 secousses à l'une des jambes, et ensuite un nombre égal et de la même manière à l'autre, puis 300 secousses à toutes les deux simultanément, en faisant communiquer l'un des pieds avec le pôle positif de l'appareil, et l'autre avec le pôle négatif. On mettait un intervalle d'une ou deux secondes entre chaque secousse, et un repos de deux ou trois minutes après qu'on en avait donné 40 ou 50. Quelques légères contractions et quelques mouvements des pieds semblaient accompagner la circulation du courant électrique. Dans l'intervalle d'une série de secousses à la suivante, on faisait quelquefois circuler le courant d'une manière continue à travers les membres de la malade; quelquefois aussi on électrisait la malade en mettant l'extrémité de l'électrode négatif, qui se termiuait en pointe aiguë, en contact avec l'endroit de la jambe dont la peau semblait la plus délicate et qu'on avait humectée avec de l'eau salée. La malade sentait alors une légère douleur semblable à celle qu'aurait occasionnée une piqûre; ce fut la première sensation qu'elle éprouva depuis le commencement de la maladie. On augmenta chaque jour le nombre des commotions, qui fut porté jusqu'à 800 ainsi que le nombre des couples de la pile, qui d'abord de 58, s'éleva jusqu'à 75. Le traitement durait une heure chaque jour; ce fut seulement douze jours après qu'il eut été commencé qu'on aperçut une amélioration. La malade éprouva successivement différentes sensations en même temps que la possibilité de faire quelques mouvements, et au bout de seize jours elle marchait sans fatigue et fut électrisée pour la dernière fois. Dans ce cas, comme dans les autres cas de guérison que cite M. Marianini, on abandonnait le traitement électrique quand on voyait que la malade était en bonne voie de guéri-

son, et on laissait celle-ci s'achever toute seule. On ne peut nier que la guérison ne fut, sinon en entier, du moins en grande partie, due à l'application de l'électricité voltaïque, quoique cette même application n'ait pas eu de résultats satisfaisants dans d'autres cas du même genre traités de la même manière par M. Marianini, qui du reste continue encore (en 1857) à se servir de ce même traitement, non sans succès.

M. Nobili, ayant remarqué dans ses recherches électro-physiologiques que, lorsqu'on avait donné le tétanos à une grenouille par le passage d'un courant électrique, on parvenait à détendre ses muscles par l'action d'un courant contraire, avait cru en conclure qu'il pourrait arriver que l'action d'un courant électrique dirigé dans un sens déterminé, servît à calmer, sinon à guérir, le tétanos chez l'homme. M. Matteucci cite en effet un cas dans lequel il a obtenu cette guérison; mais il est vrai que le malade mourut ensuite par l'effet des accidents d'un autre genre occasionnés par les blessures qui avaient déterminé le tétanos. Toutefois il ne paraît pas que ce moyen curatif ait eu plus de succès que tant d'autres essayés dans cette terrible maladie; peut-être cela tient-il à ce qu'il n'est pas encore appliqué convenablement.

Au milieu de tant d'essais et de résultats contradictoires, nous citerons comme représentant bien l'état de la science, sous le rapport de l'application thérapeutique à l'époque où il parut, un article de MM. Andral et Ratier, publié en 1831 dans le *Dictionnaire de médecine et de chirurgie pratiques*. On y trouve un résumé du travail de M. Andrieux sur l'électricité médicale, dans lequel sont énoncées plusieurs propositions dont la principale est la suivante, savoir : Que dans l'état actuel de nos connaissances, l'électricité produite par différents appareils peut être introduite dans le domaine de la thérapeutique, non pas comme un moyen spécifique applicable dans tous les cas sans distinction, mais comme un agent physique extrêmement puissant dont les effets peuvent être prévus, calculés, modifiés et dirigés avec plus de prévision que ne peuvent l'être la plupart des médicaments connus, et avec lequel on peut susciter dans l'é-

conomie les phénomènes les plus divers et par conséquent remplir un très-grand nombre d'indications curatives. M. Andrieux restreint beaucoup le cadre des maladies dans lesquelles on croyait pouvoir employer l'électricité; ainsi il croit qu'il n'y a que les effets immédiats de l'électricité sur lesquels on puisse compter.

Les essais se multipliaient aussi bien en Italie, en Angleterre et en Allemagne qu'en France. M. Rayer introduisait, dès 1830, une pile à auges dans son service à l'hôpital de la Charité et la faisait servir à traiter des paralysies de toute espèce; M. Andral fit employer également l'électricité dans plusieurs maladies. On se servait en général de piles à auges d'un plus ou moins grand nombre de couples faiblement chargés. On essaya aussi en Allemagne et en Angleterre l'application de l'électricité dans les cas d'accouchements laborieux par insuffisance des contractions utérines; mais l'expérience ne justifia point les espérances qu'on avait conçues.

La découverte des courants d'induction amena une nouvelle phase importante dans l'électricité médicale. Nous avons vu que dans l'emploi de la pile on cherchait, et c'est ainsi qu'opérait M. Marianini, à obtenir une série de secousses imitant la série des étincelles électriques plutôt qu'un courant continu dont l'effet n'était guère sensible qu'au moment de son établissement et à l'instant de sa cessation, sauf dans quelques cas, comme lorsqu'il s'agit de l'organe de la vue. Or, les courants d'induction qui sont une série de courants instantanés se succédant très-rapidement, remplissaient bien mieux que les courants de la pile et les étincelles électriques, les conditions voulues, en particulier comme stimulants, puisqu'en général l'effet physiologique du courant n'a lieu qu'au moment de son établissement et à celui où il cesse. Nous avons vu l'effet prodigieux de ces courants sur l'organisme animal, dans les expériences de M. Masson qui se servait du courant d'une pile qu'il transmettait à travers des bobines d'induction et qu'il rendait discontinu au moyen d'une roue électrique. M. Nœff, à Francfort, fut un des premiers à faire usage de ces courants au point de vue médical, en se servant, pour les produire, d'un appareil très-

simple, fondé sur le même principe que j'ai appliqué à la construction de l'instrument que j'ai nommé *condensateur électrique*[1], savoir, l'emploi d'une armature mobile, soumise à l'action d'un fer doux placé dans l'intérieur de la bobine et destinée à établir et à rompre le circuit d'un couple voltaïque, dont le courant traverse l'un des fils de la bobine pour produire l'aimantation, ce qui fait qu'il y a dans l'autre fil une succession de courants induits. Nous avons déjà décrit la cassette de M. Bonijol[2], dont l'introduction dans les hôpitaux pour produire des courants induits en vue des applications médicales se répandit bientôt et donna d'heureux résultats dans les cas de paralysie locale. On se servait également des appareils d'induction de Clarke et de Saxton[3], dans lesquels le courant produit par la pile est remplacé par un aimant permanent fixe, dont l'armature mobile est entourée d'un fil dans lequel sont produits les courants induits. Mais ces appareils plus massifs avaient l'inconvénient de ne pouvoir pas donner des courants d'intensité assez variable. Le même reproche ne peut être adressé à l'appareil de Ruhmkorff, dont on a fait aussi usage, ainsi que de beaucoup d'autres appareils d'induction construits, en vue des besoins de la physique et dont la description serait ici un double emploi, puisqu'elle a été déjà faite d'une manière complète dans le chapitre V, § 4, de notre troisième Partie. Nous nous bornerons donc à décrire ceux de ces instruments qui ont été imaginés exclusivement en vue de l'application médicale, en y joignant la description de divers appareils électriques, entre autres d'une espèce particulière de piles voltaïques, construits également dans le même but.

L'un des appareils d'induction le plus anciennement employé, en particulier dans les hôpitaux de Paris, est celui de MM. Breton frères (fig. 428), dans lequel, suivant le système imaginé par M. Page, les bobines sont placées autour des branches d'un aimant ordinaire en fer à cheval qui est fixe, tandis

[1] Tome I, page 392.
[2] *Id.*, page 389.
[3] *Id.*, page 384.

qu'une armature de fer doux mobile est mise en rotation rapide devant les faces polaires de l'aimant. Les variations d'inten-

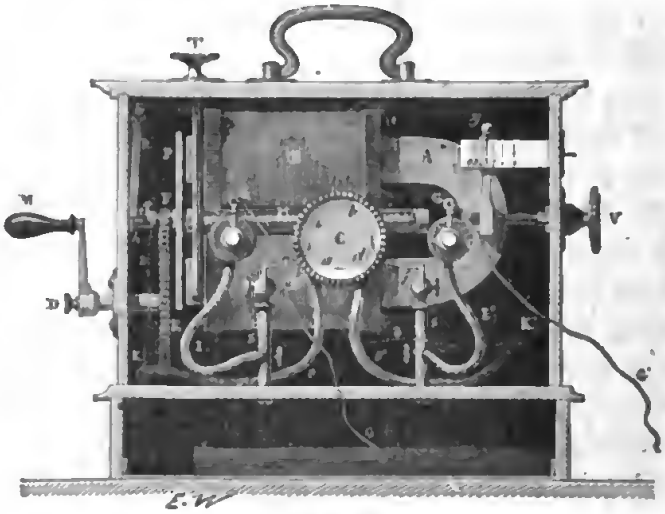


Fig. 428.

sité qui résultent dans le magnétisme de l'aimant, du passage de l'armature devant les pôles se traduisent en courants d'induction dans le fil des bobines. Pour graduer leur appareil, afin d'avoir des courants plus ou moins forts, MM. Breton se servent d'une vis de rappel avec laquelle ils éloignent ou rapprochent plus ou moins de l'aimant, le fer doux qui tourne à son extrémité. L'armature en fer doux est mise en rotation au moyen d'une chaîne sans fin qui communique avec une manivelle extérieure à la boîte qui renferme tout l'appareil. Cet instrument, comme on le voit, est très-simple, n'exigeant aucun préparatif et toujours prêt à agir, puisqu'il ne renferme pas de pile; il peut marcher des heures entières sans que sa puissance s'affaiblisse. Son énergie, qui peut être très-grande, dépend non-seulement de la distance de l'armature aux pôles, mais aussi de la vitesse avec laquelle se succèdent les intermittences; enfin elle dépend, pour chaque appareil, de la longueur et de la finesse des fils des bobines. Le seul inconvénient que présente cet appareil sous ce rapport, c'est que l'aimant fixe en fer à cheval se désaimante un peu avec le temps et qu'il faut le

réaimanter; mais cet affaiblissement dans les appareils bien construits ne se manifeste qu'au bout de plusieurs années. MM. Breton ne se contentent pas d'une seule bobine, ils enroulent autour des branches de leur aimant deux fils, l'un plus gros, l'autre plus fin, pour qu'on puisse avoir à volonté un courant à plus forte ou à moins forte tension. C'est l'aimant qui agit directement sur chacun de ces fils, seulement un peu plus fortement sur celui qui est plus rapproché. On fait communiquer l'un ou l'autre de ces fils par leurs extrémités respectives avec des conducteurs d'où partent des fils métalliques destinés à servir d'électrodes aux courants. Il est évident que l'on perçoit ainsi une succession de courants induits dirigés alternativement en sens contraires, qui sont développés par la diminution et l'augmentation d'intensité qui résultent dans le barreau aimanté de l'approche et de l'éloignement de l'armature en fer doux. Si l'on veut opérer avec une succession de courants cheminant tous dans le même sens, il faut employer un commutateur C formé d'une roue dont les dents sont alternativement en métal et en ivoire, et qui, mue par la même action que la manivelle, est combinée de façon à ne fermer le circuit que pour l'un des deux courants induits, celui qui résulte de l'approche ou de l'éloignement de l'armature.

Une modification a été introduite par MM. Gaiffe et Loiseau dans l'appareil de MM. Breton; elle consiste en ce que l'armature en fer doux est entourée elle-même à ses extrémités de deux hélices comme dans les appareils de Clarke et de Saxton, ce qui produit de nouveaux courants d'induction qu'on peut combiner avec ceux qui se manifestent dans les hélices qui entourent l'aimant lui-même.

M. Duchenne a aussi imaginé un appareil du même genre que les précédents, dans lequel l'induction est produite par un aimant permanent; mais, avant de le décrire, nous devons parler de celui du même savant, dans lequel les courants induits sont produits par l'aimantation et la désaimantation d'un fer doux, et par conséquent avec l'intervention d'une pile voltaïque. Les deux appareils de M. Duchenne ont été construits

essentiellement en vue de l'application qu'il en a faite à l'électrisation localisée[1].

Le premier appareil est celui auquel M. Duchenne a donné le nom de *volta-faradique*, pour rappeler l'idée que les courants induits découverts par Faraday sont produits par l'intervention de la pile de Volta, tandis qu'il a appelé le second *magnéto-faradique*, parce que c'est l'intervention d'un aimant, et non celle de la pile, qui détermine l'induction.

L'appareil volta-faradique (fig. 429) renferme dans un tiroir

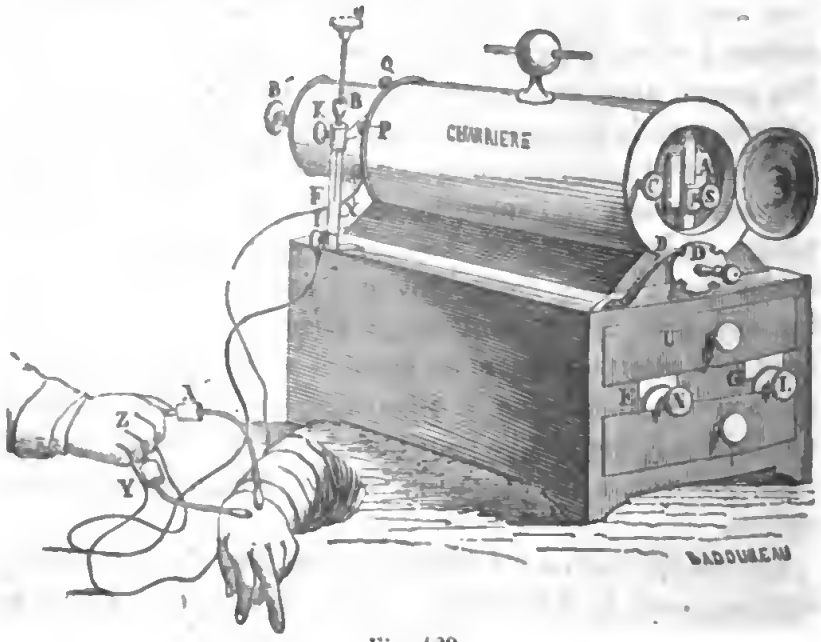


Fig. 429.

inférieur un couple voltaïque composé d'un petit baquet en zinc où se trouve une couche d'eau salée, avec laquelle est en contact une plaque horizontale de charbon imprégnée d'acide nitrique, rapprochée autant que possible du fond du baquet de

[1] M. Duchenne désigne par ces mots la méthode qu'il a imaginée, et au moyen de laquelle il est parvenu à agir exclusivement sur certains organes, entre autres sur certains muscles et à en faire ainsi la dissection sur le vivant. Cette méthode sera l'objet de notre analyse et de notre examen dans le paragraphe suivant. Pour plus de détails, nous renvoyons à son livre : *De l'électrisation localisée et de son application à la physiologie, à la pathologie et à la thérapeutique*. Paris, 1855, in-8, avec figures.

zinc. Des précautions sont prises pour qu'aucune vapeur acide ne puisse s'échapper du tiroir qui renferme la pile et venir affecter les autres parties de l'appareil[1]. Deux lames de cuivre en contact, l'une avec le zinc, l'autre avec le charbon, amènent le courant à deux plaques de platine E et G au moyen des boutons à vis L et N. C'est à ces plaques qu'aboutissent les extrémités du gros fil d'induction, qui est un fil de cuivre rouge d'un millimètre de diamètre et enroulé en hélice autour d'un faisceau de fils de fer doux. Le fil induit plus fin, également de cuivre rouge, et d'un demi-millimètre de diamètre, est enroulé autour du fil précédent. Ses extrémités aboutissent aux boutons P et Q, d'où partent deux fils servant d'électrodes. L'armature mobile, soit trembleur, se compose d'un fer doux mobile et d'une vis platinée S, contre laquelle le fer doux est repoussé. La rapidité avec laquelle le trembleur exécute ses mouvements le rend précieux dans bien des cas; mais quoiqu'on puisse, au moyen de son ressort et des pièces de fer doux mobiles dont il est muni, régulariser son action et la rendre plus ou moins rapide, cependant il est important de pouvoir avoir un moyen plus sûr et plus exact de diminuer ou d'augmenter à volonté le nombre des intermittences dans un temps donné; c'est l'office que remplit la roue dentée D fixée en dehors de la boîte sur la base de l'appareil, et qui tourne à la main au moyen d'une manivelle; elle présente à sa circonférence quatre dentelures sur lesquelles s'appuie une lame de cuivre D' qui fait ressort. On peut donc, suivant les circonstances, se servir du trembleur ou de la roue dentée. Trois autres pièces

[1] Cette pile a une durée d'action très-remarquable. M. Duchenne a observé que ce n'est qu'après cinq ou six mois d'un usage fréquent que les sels, qui résultent de l'action chimique intérieure de la pile, diminuent sa puissance en se déposant. Il faut pour rendre à la pile sa force primitive, plonger le charbon pendant plusieurs heures dans l'eau qui en dissout tous les sels, puis, après l'avoir laissé sécher, le charger d'acide nitrique comme s'il était neuf. Il faut attacher un soin tout particulier au choix du charbon. M. Duchenne est parvenu à en fabriquer un qui, moins dur que celui qu'on retire des usines à gaz, l'est pourtant encore assez pour être durable, et se trouve assez poreux pour s'imprégner facilement d'acide nitrique.

sont jointes encore à l'appareil. C'est d'abord un galvanomètre, soit rhéomètre, destiné à mesurer l'intensité du courant, et par conséquent le degré d'aimantation du fer doux de la bobine; c'est une simple aiguille de boussole entourée d'un fil que traverse le courant. On peut, au moyen de ce galvanomètre, régler l'intensité du courant du couple, de manière à être certain d'opérer toujours dans les mêmes conditions. Mais il faut, tout en restant dans ces conditions, avoir le moyen de faire varier l'intensité des courants induits. M. Duchenne y parvient de deux manières : 1° en se servant du modérateur; 2° en introduisant ce qu'il a nommé le *graduateur*. Le modérateur dont on faisait usage déjà depuis longtemps dans les appareils du même genre [1] consiste dans un tube de verre F rempli d'eau, terminé à son extrémité inférieure par un fond de métal auquel est soudé un bouton I, et à son extrémité supérieure par une virole, de laquelle part un petit crochet qui sert à mettre la tige du modérateur en communication avec l'un des boutons P ou X des courants induits, afin que le modérateur se trouve dans leur circuit. Dans la virole supérieure est placé un petit bouchon que traverse la tige J du modérateur, qu'on peut abaisser ou élever de manière à rapprocher plus ou moins son extrémité du fond métallique qui communique avec l'un des conducteurs, tandis que l'autre conducteur part de celui des boutons qui n'est pas en communication avec la tige. De cette façon, on peut faire varier dans des limites assez étendues l'épaisseur de la couche d'eau que le courant doit traverser, et par conséqueut modifier son intensité au point de la rendre presque nulle ; ce qui est nécessaire lorsqu'on agit sur des nerfs très-délicats, comme ceux de la face. Toutefois les variations qu'on obtient avec le modérateur étant encore trop grandes, quelque faible que soit l'excursion de la tige, M. Duchenne parvient à les subdiviser en quantités excessivement petites, au moyen de ce qu'il a nommé le *graduateur*. Le graduateur repose sur l'influence

[1] M Bonijol l'avait déjà ajouté à ses cassettes d'induction en 1840, en vue des applications médicales de l'électricité d'induction.

qu'exerce sur l'intensité des courants induits, une enveloppe métallique continue qui sépare le faisceau de fer doux des fils de la bobine induite. Cette influence, découverte et analysée avec soin par Dove [1], qui tient au développement de courants induits dans l'enveloppe métallique elle-même, consiste dans un affaiblissement plus ou moins considérable des courants induits dans le fil de la bobine. M. Duchenne a eu l'heureuse idée d'utiliser cette propriété pour la construction de son régulateur, qui consiste dans un cylindre P de cuivre rouge qui enveloppe la bobine, et à la partie supérieure duquel existe une échelle de graduation. On peut le faire avancer et reculer, de façon qu'il recouvre la bobine plus ou moins, et même totalement, ou point du tout. Un second cylindre intérieur, semblable au premier, enveloppe le faisceau de fer doux, et peut se mouvoir également de la même manière. Son action est naturellement plus efficace que celle du premier; M. Duchenne a trouvé que leur action combinée permet de subdiviser encore davantage l'intensité des courants. Le graduateur et le modérateur se prêtent un constant concours; on commence par chercher à obtenir avec le modérateur les courants de l'intensité voulue; puis, une fois cette intensité obtenue, on la fait varier dans des proportions minimes avec une délicatesse remarquable, en faisant marcher le graduateur d'un ou de plusieurs millimètres dans un sens ou dans l'autre.

L'appareil magnéto-faradique de M. Duchenne (fig. 430) se compose, comme les appareils du même genre, de deux barreaux aimantés réunis à leurs extrémités par un fer doux transversal. Ces barreaux sont recouverts chacun de deux bobines, dont l'une, la plus rapprochée de l'aimant, est faite d'un fil de cuivre de $\frac{1}{5}$ millimètre de diamètre et de 24 mètres de longueur; l'autre, qui recouvre la première, d'un fil de $\frac{1}{5}$ de millimètre de diamètre et de 600 mètres de longeur. Les deux fils de cuivre sont enroulés dans le même sens, et ils sont soudés ensemble par deux de leurs extrémités qui aboutissent au même bouton. L'autre extrémité du premier aboutit aux res-

[1] Tome I, page 422.

sorts S qui déterminent les intermittences sur le commutateur B, et l'extrémité libre du second aux boutons auxquels s'attachent les conducteurs destinés à conduire les courants. On peut facilement avoir ainsi séparément le courant induit du

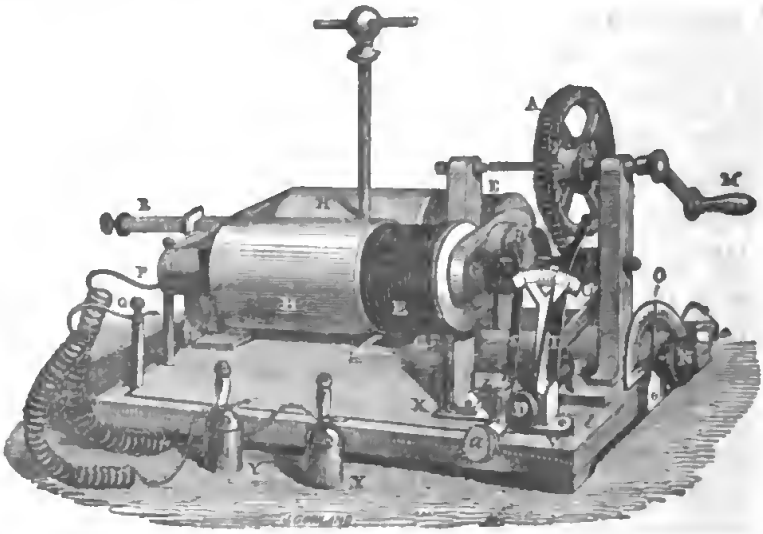


Fig. 430.

premier fil et celui du second. L'appareil du reste, à quelques différences près, est construit comme les autres appareils du même genre. En faisant faire deux révolutions par seconde à la grande roue, on obtient 64 intermittences dans le même espace de temps. La plaque mobile F, sur laquelle sont établis l'armature et son système moteur, peut être rapprochée ou éloignée de l'aimant au moyen de la vis de rappel N, ce qui permet d'avoir des courants plus ou moins intenses. Enfin l'appareil est muni d'un commutateur et d'un graduateur composé de deux cylindres de cuivre rouge mobiles, qui enveloppent chacun une bobine et qui glissent au moyen d'une tige R qui porte des divisions.

Indépendamment des appareils que nous venons de décrire, il en existe un grand nombre d'autres qui ne sont que des modifications plus ou moins heureuses des premiers. Ainsi M. Hipp, à Berne, en fabrique qui sont si peu volumineux, qu'ils

sont entièrement renfermés, la pile comprise (car ils marchent par la pile), dans une boîte d'un volume moindre que celui d'un décimètre cube. Celui de M. Éric Bernard, dont M. Bouvier, dans son rapport à l'Académie de médecine, donne une description détaillée, est aussi d'un petit volume; il chemine au moyen d'une petite pile de Grove; son interrupteur marche au moyen de l'armature mobile, mais par l'intermédiaire d'une lame et d'une pointe de platine dont le contact et l'éloignement déterminent le passage et l'interruption du courant[1]; il y a, comme dans l'appareil de M. Duchenne, deux bobines formées, l'une d'un fil plus fin et plus long, l'autre d'un fil plus gros et plus court. L'appareil de MM. Legendre et Morin présente encore un volume plus petit; la boîte qui le contient renferme, d'un côté, une petite pile construite sur le principe de celle de Bunzen, et, de l'autre, la bobine; celle-ci se compose de plusieurs fils dont on peut percevoir séparément les courants. Nous citerons encore un appareil de M. Déchargé, constructeur d'instruments de physique à Paris, et un de M. Bianchi, où l'interruption se fait au moyen d'aiguilles qui plongent dans le mercure comme dans l'appareil à rotation de Ritchie[2].

Il résulte de ce court exposé que les appareils destinés à fournir à l'électricité médicale des courants d'induction se divisent en deux classes : ceux qu'on peut appeler magnéto-électriques, dans lesquels la force émane d'un aimant permanent; ceux qu'on peut nommer volta-électriques, dans lesquels c'est une pile voltaïque (ordinairement un seul couple) qui fournit cette force. Ces derniers sont certainement d'un maniement plus commode que les premiers, puisque l'opérateur n'a point de roue à faire tourner; ils présentent aussi quelques avantages au point de vue médical, comme nous le verrons plus loin; cependant nous sommes disposés à penser, avec M. Bouvier et M. Alfred Becquerel, que les appareils magnéto-électriques

[1] Nous avons décrit ce mode, qui a servi à M. Nœff, pour étudier la lumière électrique. Tome II, page 217.

[2] Tome I, page 289.

sont, à tout prendre, préférables dans la pratique médicale.

Nous n'avons rien dit en parlant des instruments destinés à la production des courants induits, d'une question intéressante qui a été soulevée par M. Duchenne, savoir des propriétés physiologiques spéciales et toutes différentes pour chacun d'eux, dont jouissent, suivant lui, les courants induits qui se développent dans le plus gros des fils, celui qui, dans les appareils volta-électriques, conduit le courant du couple, et les courants induits qui se développent dans le second fil plus long et plus fin. Ces propriétés, sur lesquelles nous reviendrons, consistent en ce que les premiers exercent une action plus spéciale sur la contractilité musculaire, et les seconds une action plus spéciale sur la sensibilité cutanée et sur la rétine, ainsi qu'une pénétration plus facile dans l'organisme. Pour le moment, nous n'avons autre chose à faire qu'à voir quelle est la différence physique qui existe entre ces deux espèces de courants. C'est dans le paragraphe suivant que nous étudierons leurs propriétés spécifiques au point de vue physiologique.

Remarquons d'abord qu'on ne peut admettre avec M. Duchenne que les courants induits dans le premier fil soient l'origine des courants induits dans le second. Dans les appareils magnéto-électriques, il est évident que l'aimant agit également sur les deux fils, avec un peu plus de force seulement sur celui qui est plus rapproché; le premier ne peut avoir aucune action sur le second, à moins que son circuit ne soit fermé, cas dans lequel il affaiblit un peu le courant induit dans le second fil, comme le ferait une enveloppe métallique. Les deux courants ne sont pas d'ordre différent; ce sont deux courants induits du premier ordre, mais induits dans des fils de longueur et de diamètre différents et placés à des distances différentes. Il ne peut donc y avoir de différence entre ces courants qu'une différence de *quantité* et d'*intensité*, provenant de ce que l'un des fils est plus gros, plus court et plus rapproché, et l'autre plus long, plus fin et plus éloigné. Les courants du premier fil, quand ils traversent des corps bons conducteurs, doivent y produire plus d'effet; les courants du second

traverseront plus facilement un conducteur plus imparfait, à cause de leur plus grande tension. Il est facile déjà d'entrevoir, dans les différences physiques de ces courants, la cause de leur différence d'action physiologique.

Mais c'est surtout dans les appareils volta-électriques que M. Duchenne trouve la différence dont il s'agit; pour montrer qu'elle ne tient pas à des différences de conductibilité, il a employé, dans la construction de la première bobine, un fil de même longueur et de même diamètre que celui de la seconde, et il a encore trouvé les différences que nous avons signalées. Ici la question est plus complexe; nous reconnaissons avec M. Duchenne que le courant qui circule dans la première bobine peut bien agir sur le fil de la seconde, puisque nous savons que, lors même qu'il n'y a pas de fer doux, l'induction s'opère, mais la présence du fer doux l'augmente dans une proportion énorme, et les deux actions, agissant pour produire le même effet, elles s'ajoutent. Le courant induit dans le second fil, est donc tout à fait semblable à celui qu'y induirait l'action directe d'un aimant, et nous ne pouvons, en conséquence, voir dans ce courant qu'un courant du premier ordre, et non un courant du second, comme le désigne M. Duchenne. Quant au courant induit dans le fil même qui conduit le courant de la pile et qui se manifeste au moment où ce courant cesse de passer, c'est ce que Faraday et tous les physiciens ont appelé après lui, l'*extra-courant*. Nous reconnaissons ici qu'il peut y avoir, entre l'extra-courant et le courant induit dans le second fil, d'autres différences physiques que celles relatives à la quantité et à l'intensité, et que par conséquent, tout en combinant les bobines de façon que, sous ces deux rapports, les courants soient semblables, ils peuvent encore différer sous d'autres. D'abord l'extra-courant ne se compose jamais que d'un seul courant induit, celui qui marche dans le même sens que le courant de la pile[1], tandis que le courant induit proprement dit se compose de deux courants instantanés dirigés alternativement en sens contraire. Cette différence peut

[1] Tome I, page 362.

bien en entraîner une dans l'action physiologique; mais il y en a encore une autre qui fait qu'en ne prenant dans le second fil que l'un des deux courants induits, celui qui, comme l'extra-courant, résulte de l'interruption du circuit, il peut arriver qu'on ne trouve pas complète identité entre l'extra-courant et le courant induit proprement dit; c'est lorsque le circuit du premier est disposé de façon à renfermer le couple même qui le produit, ce qui doit diminuer son instantanéité, et en même temps l'augmenter en quantité, comme cela a lieu dans le condensateur électro-chimique que j'ai décrit [1]; tandis que le second a nécessairement toujours un circuit tout métallique. Nous verrons plus loin si ces différences peuvent expliquer les différences d'action observées par M. Duchenne.

Nous avons dit que, malgré l'introduction, dans la pratique médicale, des courants induits, on y faisait encore usage des courants produits par la pile voltaïque; nous avons remarqué qu'on se servait, pour produire ces courants, des piles les plus simples, zinc et cuivre, chargées avec de l'eau salée et composées d'un nombre plus ou moins grand de couples. On a imaginé, en vue de ce genre d'application, des piles d'une espèce particulière, nommées *chaînes galvaniques*, et qui ont l'avantage d'avoir une assez forte tension et d'être en même temps d'un maniement très-facile. Telle est la chaîne galvano-électrique de Goldberger, qui se compose d'une série de chaînons de zinc et de cuivre, terminée, d'un côté, par un crochet, et, de l'autre, par un cylindre de verre; pour l'appliquer, on la trempe préalablement dans le vinaigre; mais il est évident qu'elle ne peut produire aucun effet, ou tout au plus l'effet d'un seul couple. Il n'en est pas de même des chaînes de Pulvermacher, qui sont des piles voltaïques d'une forme très-ingénieuse, qui présentent un grand nombre de couples sous un très-petit volume, et sont par conséquent douées d'une forte tension électrique. Voici comment sont fabriquées ces piles. Une longue tige de bois, convenablement préparée, est recouverte mécaniquement d'un fil de zinc et d'un fil de laiton, qui

[1] Tome I, page 391, et tome II, p. 632.

sont enroulés autour de la tige sans se toucher, mais en étant très-rapprochés l'un de l'autre; ils sont un peu incrustés dans le bois par la pression qu'on exerce sur eux pour les enrouler. Une fois recouverte, cette tige est coupée en morceaux plus ou moins longs, contenant un certain nombre de tours, par exemple dix, de chaque fil; à un bout le fil de zinc est libre, tandis que le fil de laiton vient s'attacher à un petit crochet de cuivre planté dans l'axe du bois; à l'autre bout, c'est le fil de laiton qui est libre, tandis que le fil de zinc vient par son extrémité se souder à un autre crochet planté dans l'axe; les petits maillons représentent chacun un couple, soit élément de pile, en supposant que le bois fasse office de conducteur humide. Pour constituer la pile, on les accroche les uns aux autres dans l'ordre convenable, de manière que le crochet de zinc du premier couple reçoive le crochet de laiton du second, et ainsi de suite (fig. 431). On forme de cette manière une chaîne de 10, 20 et même 100 éléments. Pour la charger, il suffit d'humecter le bois en trempant la chaîne (fig. 432)

Fig. 431.

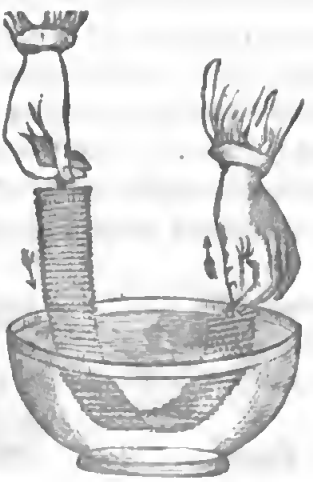


Fig. 432.

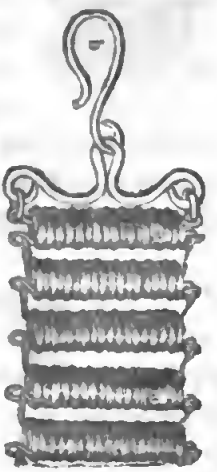


Fig. 433.

dans de l'eau légèrement acidulée à l'acide acétique. On reçoit alors une vive commotion quand on vient à en toucher les deux extrémités avec la main; ces commotions persistent tant que la chaîne demeure humectée. Au lieu d'une chaîne longue

et étroite, on peut en avoir une courte et large en disposant les éléments parallèlement les uns aux autres (fig. 433), ce qui forme une pile d'une tension beaucoup moindre, mais plus puissante en quantité. La première pile est destinée à faire parcourir au courant la plus grande étendue de la partie malade, et la seconde à circonscrire la force du courant dans un espace étroit.

On peut, au lieu d'avoir un courant continu, se procurer, au moyen de ces piles, un courant discontinu semblable aux courants d'induction, quand le traitement l'exige. Deux petits appareils ont été imaginés dans ce but par M. Pulvermacher. Le premier, dit *cylindre interrupteur*, est un petit tube (fig. 434) avec un anneau de cuivre à chaque extrémité; il contient un ressort à boudin métallique mobile à son extrémité libre. Quand on l'adapte entre deux chaînes ou entre l'un des pôles et le conducteur, le courant est alternativement rompu et rétabli par chaque mouvement du cylindre qui met cette extrémité en vibration; ainsi on a des interruptions consécutives, mais irrégulièrement espacées. Pour les avoir régulières, il faut se servir du second appareil (fig. 435), dont le mécanisme est fixé dans un conducteur à manche isolant, au moyen duquel on remonte le mou-

Fig. 434.

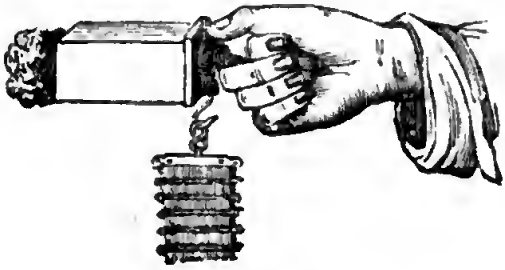


Fig. 435.

vement. On accroche l'un des pôles de la chaîne électrique à l'anneau mobile de l'instrument qu'on met en mouvement,

en poussant de droite à gauche avec le pouce une petite pièce, soit aiguille en corne; en la poussant plus ou moins, on rend les intermittences, et par conséquent les secousses, plus ou moins fréquentes. Quand on veut arrêter le mouvement, il suffit de ramener l'aiguille en corno au point de départ.

Il y a, suivant M. Pulvermacher, deux manières d'appliquer les chaînes électriques. L'une consiste à intercaler l'organe qu'on veut traiter entre les deux pôles de la chaîne, de manière que l'un des pôles aboutisse à la région malade, et que l'autre soit placé sur une partie saine et, autant que possible, sur un centre nerveux correspondant avec l'organe malade; c'est la méthode ordinaire d'application du courant électrique, qui permet même de localiser son action. La seconde manière d'employer les chaînes consiste à les appliquer en ceintures sur les parties malades, atteintes soit de rhumatismes, soit de névralgies, en ayant soin d'unir les deux pôles au moyen d'un crochet qu'on passe dans une agrafe en tendant et consolidant la chaîne. Nous ne comprenons pas très-bien l'effet de cette disposition en vertu de laquelle le courant ne doit circuler guère que dans la chaîne sans traverser, du moins d'une manière bien sensible, aucune partie du corps, car il ne peut pas même y avoir de courant dérivé, à cause de l'imparfaite conductibilité de la peau. Au reste, aucun fait bien positif n'a constaté l'efficacité de ce dernier mode d'application, sur lequel l'expérience n'a pas encore prononcé.

On doit conserver le même doute sur les ceintures et mixtures électriques de MM. Breton. La ceinture est une véritable pile à un seul élément composé de deux lamelles de zinc appliquées sur une semelle double de cuivre, mais séparées de celle-ci par un mastic humide. Cinq boutons, fixés à l'extrémité de fils métalliques, soudés à la surface de ces métaux, forment autant de pôles positifs ou négatifs, dont le contact avec la peau donne, dit-on, lieu à plusieurs courants dérivés qui la parcourent en tous sens. Cette électricité est très-faible, surtout quand le mastic se dessèche, et la peau ne pourrait en ressentir l'action que lorsqu'elle serait dépouillée de l'épi-

derme en quelque point. Quant à la mixture électrique, elle se compose de deux pâtes contenant, l'une de la poudre de zinc, l'autre de la poudre de cuivre, mêlées à de la poudre inerte de bois et à une solution de chlorure de calcium destinée à conserver leur humidité. On renferme ces deux mixtures chacune dans un sachet de toile qu'on place dans un linge mouillé; puis, à travers de petites ouvertures pratiquées à ces enveloppes, on enferme et on fixe au milieu de chaque mixture la tige d'un bouton de métal. Ces boutons appliqués dans la peau lui transmettent, dit-on, comme ceux de la ceinture électrique, l'électricité produite par les réactions chimiques qui ont lieu dans les sachets. Nous ne nions point qu'il n'y ait production de courants dans ces appareils; le galvanomètre même indique leur présence; mais ce sont des courants très-faibles, et nous ne voyons pas quels avantages peuvent présenter ces dispositions qui reposent au fond sur les fausses idées de l'électricité de contact. Nous croyons, en résumé, que quand on veut employer l'électricité à l'état de courant continu, ce qu'il y a de mieux, c'est de faire usage des piles de Pulvermacher, supérieures, sous le rapport de l'économie et de la facilité de la manutention, aux piles ordinaires lorsqu'il s'agit d'obtenir une forte tension, ce qui est le cas dans le genre d'application qui nous occupe.

Après avoir décrit les principaux appareils producteurs de l'électricité qu'on emploie dans la thérapeutique électrique, il est nécessaire d'ajouter quelques mots sur les moyens dont on se sert pour amener l'électricité aux organes eux-mêmes. Les intermédiaires situés aux extrémités des fils conducteurs, et qui sont destinés à être mis en rapport avec la peau, les tissus ou les organes, doivent être nécessairement bons conducteurs de l'électricité; ils sont de différentes espèces. Ce sont d'abord des conducteurs métalliques, de cuivre en général, qu'on met en contact avec la peau, soit des cylindres plus ou moins volumineux destinés surtout à être serrés entre les mains, soit des plaques plus ou moins larges, destinées à être appliquées sur une surface d'une certaine étendue, soit des boutons, des boules, des cônes métalliques d'un volume et

d'une forme que l'on peut disposer à volonté suivant l'usage qu'on veut en faire et la partie sur laquelle on désire agir. On a quelquefois recours à des tiges métalliques droites ou recourbées, et destinées à être introduites à une certaine profondeur dans les cavités pour y diriger les courants. On peut même, pour mieux localiser le courant, c'est-à-dire le faire parvenir directement aux portions mêmes du corps sur lesquelles on veut qu'il agisse, introduire des aiguilles en acier ou en platine dans l'épaisseur des muscles et faire passer le courant entre deux aiguilles placées à une certaine distance l'une de l'autre, soit dans le même muscle, soit dans le même membre, soit enfin entre deux points quelconques, entre lesquels on veut qu'il circule. Malgré quelques légers inconvénients auxquels, avec des soins et de l'adresse, il n'est pas difficile de parer, ce procédé d'électro-puncture a bien des avantages, et en particulier celui de localiser très-bien l'action des courants et de réveiller beaucoup mieux la contraction musculaire dans les muscles qui en sont privés. A défaut de ce moyen, qui d'ailleurs n'est pas toujours applicable, on se sert d'éponges imbibées d'un liquide conducteur qui est en général de l'eau salée. Deux éponges ainsi humectées sont logées chacune dans un godet métallique placé à l'extrémité des fils conducteurs et en communication avec eux. Ces deux godets métalliques sont supportés par des tiges isolantes destinées à être tenues entre les mains de l'expérimentateur; on fait usage des éponges comme des aiguilles dans l'électro-puncture, pour faire passer le courant dans la direction voulue. L'emploi des éponges est très-précieux en ce qu'il localise parfaitement le courant, et il a rendu de très-grands services entre les mains de M. Duchenne. On fait usage de pinceaux ou brosses métalliques quand on veut agir énergiquement sur la peau en produisant l'électrisation cutanée. L'application de l'électricité par bains, soit locaux, soit entiers, paraît devoir être susceptible de rendre d'assez grands services en agissant comme un puissant stimulant dans des cas de débilité profonde, d'anémie portée à un haut degré, etc.

§ 2. Analyse des effets thérapeutiques directs de l'électricité.

Avant de nous occuper d'une manière spéciale des effets thérapeutiques directs de l'électricité, rappelons brièvement ses effets généraux sur l'organisme. Nous les avons déjà étudiés, il est vrai, dans le chapitre IV de notre quatrième partie; mais il n'est pas inutile d'y revenir, surtout maintenant que nous pouvons les rapprocher des phénomènes électriques qui accompagnent les actions physiologiques et que nous avons analysés dans le chapitre Ier de la sixième partie [1].

Commençons par rappeler que nous sommes arrivés à reconnaître, à la suite des travaux de M. Matteucci et de M. Dubois-Reymond, que les muscles et les nerfs ont un état électrique qui leur est propre. Nous avons cherché à nous faire une idée de cet état qui consiste dans une disposition particulière que prennent, sous l'influence de la force vitale, les molécules que nous avons regardées comme douées dans la matière organique, aussi bien que dans l'inorganique, de deux pôles contraires. Sous l'action de la volonté ou des autres causes qui déterminent la contraction musculaire ou la sensation, cette disposition se modifie de façon qu'elle devient tout à fait semblable dans le nerf comme dans le muscle, à ce qu'elle est dans un conducteur qui transmet un courant électrique. Sans revenir sur ce sujet que nous avons suffisamment développé, nous nous bornerons à insister seulement sur deux points qui ont quelque importance pour la question qui va nous occuper.

M. Dubois-Reymond avait attribué le phénomène de la contraction induite, découvert par M. Matteucci [2], non pas à une production d'électricité qui accompagnait la contraction musculaire, mais à une diminution du courant musculaire ordi-

[1] Tome III, page 1.
[2] Tome III, page 33.

naire, qui aurait lieu au moment de la contraction, et qui ferait prévaloir une force électro-motrice opposée, et en particulier celle provenant des polarités secondaires des électrodes destinés à conduire le courant. Pour démontrer que ce n'est pas ainsi qu'il faut interpréter le phénomène, M. Matteucci emploie pour fermer le circuit, au lieu de lames de platine plongeant dans l'eau salée, deux lames de zinc distillé communiquant chacune avec une extrémité du galvanomètre, et immergées dans une dissolution de sulfate de zinc neutre et saturée; il est facile de s'assurer que, par ce moyen, il n'y a pas trace de polarité secondaire, comme l'avait déjà vu M. Jules Regnauld qui s'en est servi le premier. Partant de là, tout étant disposé convenablement et l'aiguille du galvanomètre étant bien en équilibre, il n'y a qu'à placer, comme le fait M. Dubois-Reymond, un gastrocnémien ou une cuisse entière fournie de son nerf, entre les deux appendices de papier humecté, qui plongent respectivement dans les verres remplis de sulfate de zinc où sont les électrodes en zinc; après avoir attendu que l'aiguille soit arrêtée, on fait contracter le muscle; alors l'aiguille dévie rapidement dans un sens opposé, ce qui ne peut être attribué ici à l'action d'une force électro-motrice préexistante. M. Matteucci en conclut qu'il y a un courant instantané, ou plutôt une décharge dans le muscle au moment de la contraction, ce qui nous paraît, du reste, extrêmement probable, car c'est une conséquence de la disposition nouvelle que doivent prendre dans la contraction, les unes à l'égard des autres, les molécules bipolaires qui constituent le muscle.

Le second point, sur lequel nous croyons utile de fixer encore un instant notre attention, est relatif à des expériences fort curieuses de M. Helmholtz, qui conduisent à la même conséquence. Elles sont relatives à la durée des phénomènes de la contraction musculaire et de la transmission de l'excitation nerveuse. Au moyen de procédés et d'appareils fort délicats et en opérant sur le muscle gastrocnémien d'une grenouille très-vivace, chargé seulement en commençant, du poids d'un petit appareil, et plus tard de quelques petits poids additionnels placés dans un bassin supporté par l'appareil, M. Helm-

holtz a reconnu qu'il s'écoule une certaine durée entre l'excitation du muscle et le moment où son énergie commence à augmenter; c'est en faisant usage d'une manière très-ingénieuse de courants continus combinés avec des courants d'induction, que le savant physicien allemand est parvenu à apprécier un intervalle de temps aussi petit que celui dont il s'agit, mais pourtant sensible; il a employé dans ce but la méthode dont M. Pouillet s'est servi le premier pour mesurer de très-courts intervalles de temps, et qui consiste à observer l'effet qu'un courant électrique continu produit, pendant la durée de l'intervalle à mesurer, sur l'aiguille du galvanomètre.

M. Helmholtz a fait passer un courant électrique continu dans un circuit fermé par une pièce métallique suspendue à l'extrémité inférieure du muscle, en ayant soin qu'au moment précis où ce courant commençait à circuler, un courant d'induction vînt exciter le muscle ou son nerf; à l'instant où le muscle a possédé une énergie suffisante pour soulever les pièces suspendues à son extrémité, le circuit traversé par le courant continu s'est trouvé interrompu, et la déviation de l'aiguille du galvanomètre a permis d'apprécier le temps très-court pendant lequel ce courant avait circulé, et par conséquent la durée nécessaire au développement de l'énergie musculaire; en faisant varier le poids suspendu au muscle, on a pu mesurer les durées nécessaires au développement de divers degrés d'énergie, et arriver à des résultats intéressants sur la marche graduelle de la contraction.

Dans toutes les premières expériences que M. Helmholtz a faites, le muscle était directement excité par le passage d'un courant électrique; c'est en faisant passer le courant par le nerf adhérent au muscle qu'il est parvenu à rendre sensible la durée nécessaire à la transmission de l'excitation nerveuse. Le résultat de ses observations peut se formuler de la manière suivante : l'excitation étant produite par un courant qui traverse une longueur du nerf de 5 à 6 millimètres, il s'écoule des temps différents entre le moment de l'excitation et le moment où les poids suspendus au muscle sont soulevés, suivant que la partie du nerf excitée est voisine ou éloignée du mus-

cle [1]. L'explication la plus simple de ce résultat est d'admettre que la transmission de l'excitation nerveuse à travers une longueur de nerfs de quelques centimètres exige une durée sensible; ce qui, comme nous l'avons déjà remarqué, est une conséquence naturelle de la manière dont, d'après les expériences de M. Dubois-Reymond, nous expliquons la propagation de l'action nerveuse en l'attribuant à une modification matérielle dans l'arrangement des particules en vertu de leur polarité électrique [2].

Cette modification peut même être rendue sensible à l'œil au moyen du microscope, ainsi que l'a montré dernièrement M. Amici qui est parvenu, au moyen de son admirable microscope composé, à se faire une idée exacte de la structure de la fibre musculaire élémentaire. Il a trouvé qu'un simple filet musculaire était composé d'une série de disques excessivement minces et excessivement rapprochés, liés les uns aux autres au moyen d'un grand nombre de fils infiniment fins, allant de la circonférence de l'un des disques à celle de l'autre, comme les génératrices d'un cylindre. Quand la contraction a lieu, on voit ces fils rentrer intérieurement en formant une ligne brisée, de manière à opérer le rapprochement des disques qui, au lieu de rester les deux bases d'un cylindre, semblent être les bases de deux cônes tronqués opposés par leur petite base. Il résulte de ce changement un

[1] La vitesse de prepagation de l'excitation nerveuse est dans le nerf sciatique de la grenouille de 30 mètres par seconde environ. Le refroidissement du nerf diminue beaucoup cette vitesse de transmission ; c'est en refroidissant les nerfs avec de la glace que M. Helmholtz a pu constater ce résultat d'autant plus intéressant qu'il se produit lors même qu'on refroidit un point du nerf plus éloigné du muscle, que le point où l'on détermine l'excitation.

[2] On ne peut expliquer les phénomènes, en supposant que l'excitation nerveuse produise sur le muscle un effet d'autant moindre que la portion du nerf qui est excitée se trouve plus éloignée du muscle. Des expériences directes ont en effet montré que l'énergie musculaire était exactement la même dans les deux cas. Tant que la vitalité du nerf n'a pas commencé à s'affaiblir, on reconnaît une identité complète entre les courants électriques nécessaires pour développer à son maximum l'énergie du muscle par l'excitation de deux portions du nerf différentes, et par conséquent situées à des distances inégales du muscle.

raccourcissement de la fibre entière, ainsi que cela est facile à concevoir. Quant aux disques eux-mêmes, ils sont comme des espèces d'anneaux dont la circonférence, plus compacte et plus résistante, sert de point d'attache aux fils, tandis que leur partie centrale est remplie d'une matière molle, analogue à celle qu'on trouve dans les infusoires, et qui semble être la matière qui forme le muscle. Cette constitution de la fibre musculaire élémentaire, qui n'est point une simple hypothèse, puisqu'elle résulte de l'inspection faite au microscope, est tout à fait propre à confirmer l'opinion que nous avons émise sur la cause de la contraction. En effet, dans l'état de repos et sous l'influence de la force vitale, les particules de chaque disque ou anneau ont leurs pôles négatifs tournés intérieurement et leurs pôles positifs extérieurement; mais sous l'action d'une cause quelconque, les particules font une demi-révolution qui fait tourner leurs pôles négatifs au-dessous et les positifs au-dessus, ou réciproquement; il en résulte alors que ces particules, ayant leurs pôles contraires placés tous les uns près des autres dans la même direction rectiligne, qui est le sens de la longueur de la fibre, elles s'attirent mutuellement, ce qui fait rapprocher les disques, comme cela a effectivement lieu dans la contraction.

Après avoir rappelé brièvement la manière dont se comportent les nerfs et les muscles quant à leur état électrique propre, étudions de plus près que nous ne l'avons fait, l'action générale et spéciale qu'exercent sur eux les courants électriques, afin de pouvoir en conclure d'uue manière plus rationnelle leur effet thérapeutique.

L'électricité agit sur l'organisme de deux manières : 1° en stimulant les muscles et eu remplaçant ou renforçant l'action que les nerfs exercent sur eux; 2° en stimulant les nerfs eux-mêmes, et par conséquent en augmentant ou diminuant l'action naturelle des centres nerveux.

Nous ne revenons pas pour le moment sur l'effet général de l'électricité sur les muscles, que nous avons étudié avec soin, mais nous nous arrêterons quelques instants à ce qui concerne cet effet sur les nerfs.

Nous avons déjà vu l'effet sur les nerfs des courants directs et inverses; nous savons que, quelle que soit la direction du courant, lorsqu'il est intense, tous les muscles auxquels se distribue le nerf, dont une partie est traversée par ce courant, se contractent à l'instant où l'on ferme comme à l'instant où l'on ouvre le circuit, et il y a en même temps de la douleur. Tant que le circuit est fermé, il n'y a ni contraction, ni douleur, ce qui tient à l'état particulier dans lequel le passage du courant met les nerfs et les muscles. Nous savons également que les contractions sont plus fortes au début qu'à la cessation du courant direct, et que c'est le contraire quand le courant est inverse, tandis que la douleur suit la marche opposée. L'action des courants est remarquable sur un nerf mixte d'un animal récemment tué ou vivant. Si l'on y fait circuler un courant continu, l'excitabilité est diminuée ou détruite quand le courant est direct; elle est conservée et même augmentée quand le courant est inverse. Si ce même nerf a été parcouru par le courant direct, le repos lui rend assez promptement une partie de son excitabilité; si, au contraire, il a été parcouru par le courant inverse, il perd par le repos une partie de l'excitabilité que le passage de ce même courant inverse lui avait donnée. Le temps de repos nécessaire à un nerf, pour revenir dans les deux cas à son état normal, est très-variable; il est beaucoup plus court dans les nerfs très-excitables que dans les autres. Toutes ces expériences exigent, pour réussir, des courants faibles et modérés; des courants intenses diminuent toujours l'excitabilité du nerf, et quelquefois la suppriment complétement pendant un certain temps. Cette diminution ou suppression a lieu à un degré plus élevé lorsque le courant parcourt le nerf de la périphérie au centre que dans la direction opposée, qui est celle, comme nous l'avons établi, du courant naturel qui a lieu dans le nerf au moment où, sous l'influence du cerveau, ce nerf détermine la contraction du muscle auquel il aboutit.

L'action hyposthénisante des courants continus est un fait qui ressort de toutes les expériences du genre de celles que nous venons de rapporter, et qui peut être utilisé d'une ma-

nière précieuse dans la thérapeutique. M. Remack, en opérant sur l'homme avec des courants continus, a cru pouvoir constater que ces courants avaient la propriété de faire cesser la contraction en conservant aux muscles la faculté d'obéir à la volonté, et en la leur restituant même dans le cas où ils l'auraient perdue. On conçoit l'importance qu'aurait ce fait pour la thérapeutique s'il se vérifiait dans tous les cas; nous avons déjà cité un fait analogue à l'occasion du traitement du tétanos par la circulatiou d'un courant continu, imaginé par M. Matteucci.

Si les courants qui traversent un nerf, au lieu d'être continus, sont discontinus, les muscles auxquels ce nerf se distribue se contractent violemment et sont comme dans une sorte de contraction tétanique; en même temps l'excitabilité de ce nerf est très-affaiblie, surtout si on la compare à celle d'un autre nerf sur lequel on a fait agir un courant continu. Quand les courants discontinus sont faibles et dirigés alternativement en sens contraires, l'action hyposthénisante est très-faible, parce que la perte d'excitabilité produite par le courant direct est compensée par l'augmentation d'excitabilité déterminée par le courant inverse; quand, au contraire, les courants sont intenses, l'action hyposthénisante, due au courant direct, devient un phénomène prédominant. On doit éviter avec soin en thérapeutique la production de ce phénomène, en ne faisant usage que de courants faibles et dirigés alternativement en sens contraires, quand on veut réveiller la vitalité et exercer une influence tonique sur la vie organique des parties sur lesquelles on agit.

Nous avons supposé dans ce qui précède qu'on agit immédiatement sur le nerf avec le courant; mais, dans les applications thérapeutiques, cette action directe ne peut pas avoir lieu, sauf dans des cas exceptionnels; c'est donc à travers la peau, à l'aide d'un conducteur humide, qu'on doit exercer sur les nerfs l'action de l'électricité. Comme les muscles conduisent mieux l'électricité que les nerfs, il faut, pour pouvoir concentrer l'action de l'électricité sur ces derniers, qu'ils ne soient pas à une trop grande profondeur, qu'ils soient pour

ainsi dire superficiels, ou bien en contact seulement avec les tendons des aponévroses ou avec du tissu cellulaire; en tout cas, il n'y a jamais qu'une partie du courant qui traverse le nerf sur lequel on agit. M. Duchenne a donné la liste assez nombreuse des nerfs sur lesquels il est parvenu à porter ainsi les courants; nous y reviendrons plus loin en nous occupant d'une manière un peu plus spéciale de l'action de l'électricité localisée, soit sur les muscles, soit sur les nerfs. Pour le moment, bornons-nous à remarquer qu'il y a une grande différence entre les nerfs moteurs, d'une part, et les nerfs mixtes et sensoriels, d'autre part, quant à l'action des courants; ces derniers étant susceptibles d'éprouver quelques effets des courants continus, tandis que les premiers n'en éprouvent que de la part des courants discontinus, ou qui, tout en étant continus, présentent des variations d'intensité. Il en résulte que, pour réveiller l'activité fonctionnelle des nerfs mixtes et des nerfs sensoriels, on peut faire usage indifféremment, soit de courants continus, soit de courants discontinus, quoiqu'il soit préférable, le plus souvent, d'employer ces derniers qui sont plus stimulants que les premiers; tandis que, pour les nerfs moteurs, il ne faut employer que les courants discontinus. Aussi a-t-on vu des paralysies du sentiment être guéries au moyen de courants continus, tandis que ces mêmes courants avaient complétement échoué pour des paralysies du mouvement.

On ne s'est pas borné à étudier les effets de l'électricité sur les muscles et les nerfs; on a également cherché à déterminer son action sur les centres nerveux. C'est à Weber qu'on doit les recherches les plus intéressantes sur ce point. Il a observé que la moelle épinière étant soumise à l'action des courants discontinus, il y a dans tous les muscles du tronc de violentes contractions tétaniques; mais ce qu'il y a de curieux, c'est que la moelle ne se comporte point comme un simple conducteur de courants dérivés qui se porteraient sur les nerfs, mais qu'elle agit par l'effet de son action propre qu'excite le passage de l'électricité. Entre autres preuves que c'est bien ainsi que se passe le phénomène, nous pouvons citer le fait que, lorsqu'on fait une section complète de la moelle, en laissant en

contact les surfaces divisées, ce qui n'empêche pas les courants dérivés de traverser, mais ce qui arrête la transmission de l'action médullaire proprement dite, on n'obtient, en portant l'excitation électrique à l'extrémité inférieure de la moelle, aucun mouvement convulsif dans les muscles supérieurs, et il n'y a de convulsions que dans les membres inférieurs; tandis que le mouvement convulsif a lieu dans les uns aussi bien que dans les autres, en appliquant l'électricité de la même manière, si la moelle n'est pas coupée. L'excitation électrique de la moelle allongée produit les mêmes convulsions tétaniques que celles de la moelle épinière. On n'aperçoit ni contractions ni signes de chaleur, quand on agit avec les courants discontinus sur les hémisphères cérébraux ou sur le cervelet d'un animal vivant.

Quant aux nerfs ganglionnaires, on n'a pas pu agir directement ni sur les ganglions ni sur leurs filets nerveux, mais bien sur les organes auxquels ils se distribuent. On a trouvé que les nerfs de la vie organique déterminent des contractions dans les muscles auxquels ils se rendent, seulement quelques instants après qu'on a commencé à les exciter, et que de plus ces contractions persistent après qu'on a cessé de les stimuler; les contractions se propagent même à des muscles autres que ceux dans lesquels se rendent les nerfs stimulés; enfin les contractions s'exécutent et se succèdent dans un ordre qui répond à un but déterminé en rapport avec les fonctions de l'organe dans lequel on les constate. Ces résultats, que nous empruntons au résumé qu'en a fait M. Valérius, ne sont vrais que pour les muscles qui reçoivent leurs filets du grand sympathique.

Comme nous l'avons dit plus haut, nous ne nous étendrons pas ici pour le moment sur l'effet des courants sur les muscles de la vie de relation et sur ceux de la vie organique; M. Duchenne, comme nous le verrons, croit qu'il y a des différences entre les muscles quant à leur susceptibilité de se contracter sous l'influence des mêmes courants électriques; différences qui ne tiennent peut-être qu'à la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'électricité peut pénétrer dans les divers muscles.

Mais ce qui paraît bien positif, d'après M. Duchenne, c'est qu'il existe une grande différence entre les muscles quant à la sensibilité qu'ils présentent quand on les fait traverser par des courants discontinus; il est évident que cette différence tient aux ramifications nerveuses plus ou moins nombreuses qui s'y distribuent. Ainsi la sensibilité est très-vive dans les muscles de la face, ce qui provient des nerfs de la cinquième paire. Quant aux muscles de la vie organique, ils se contractent sous l'influence de l'électricité, mais à un moindre degré que ceux de la vie de relation; de plus, les contractions se produisent plus lentement et durent plus longtemps que dans les autres muscles après qu'on a cessé de les exciter par l'électricité; tel est le cas pour les intestins grêles, pour l'estomac, le cœcum, etc. La peau éprouve des effets assez remarquables de l'application de l'électricité, mais ces effets varient au plus haut degré suivant les différents individus; on voit souvent la peau des membres présenter le phénomène connu sous le nom de *chair de poule*, dans lequel les poils se hérissent et leurs bulbes font saillie au dehors, la peau elle-même se contracte, ce qui, suivant M. Brown-Séquard, ne serait pas dû aux fibres-cellules, qui sont peu nombreuses dans cette partie du corps, mais bien au tissu cellulaire, qui lui-même est contractile.

Il nous faut encore, avant d'examiner de près les cas pathologiques dans lesquels l'application de l'électricité peut être une heureuse ressource, nous arrêter quelques instants sur la méthode si remarquable de l'électrisation localisée de M. Duchenne, que nous n'avons citée qu'en passant, et dont nous venons de voir l'application dans quelques-uns des résultats que nous avons énoncés. Les faits qui ont servi de base à cette méthode consistent simplement en ce que, suivant que les excitateurs ou électrodes du courant sont secs ou humides, et suivant que la peau elle-même est sèche ou humide, on peut à volonté ou concentrer l'action électrique dans la peau, ou la faire traverser sans incision ni piqûre la peau elle-même, pour la limiter dans les organes situés au-dessous, c'est-à-dire dans les nerfs, dans les muscles et même dans les os. Aussi, pour obtenir ce résultat, il faut qu'à la fois les électrodes, qui sont

des éponges imbibées d'eau salée, et la peau elle-même, soient également très-humides; alors on n'observe ni étincelles, ni crépitations, ni sensations de brûlure, mais on obtient des phénomènes de contractilité et de sensibilité très-variables, suivant qu'on agit sur un muscle ou sur un faisceau musculaire, sur un nerf ou sur une surface osseuse; cas dans lequel on détermine une douleur vive, d'un caractère tout particulier, ce qui fait qu'on doit éviter avec soin de placer les électrodes sur une semblable surface. Dans tous les cas autres que ceux que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire si les deux électrodes sont secs ou que l'un seulement soit mouillé, si la peau seule est mouillée les électrodes étant secs, la recomposition électrique a toujours lieu uniquement dans la peau, soit à sa surface, soit dans son épaisseur avec ou sans étincelles et crépitations. M. Duchenne s'est encore assuré par plusieurs faits que, lorsque l'électricité, grâce à l'humidité des électrodes et de la peau, va chercher les organes sous-cutanés, elle n'agit point physiologiquement sur la peau, et que la sensation produite ne doit être attribuée qu'à l'excitation directe des muscles.

Indépendamment de la précaution que nous venons d'indiquer, l'électrisation localisée exige, pour être complète, l'emploi de certains courants de préférence à d'autres; c'est ce qui résulte de la comparaison que M. Duchenne a faite sous ce rapport entre l'électricité des machines ordinaires et la bouteille de Leyde, celle de la pile voltaïque et celle des appareils d'induction, désignant l'emploi de ces trois espèces d'électricités sous les noms d'*électrisation*, *galvanisation* et *faradisation* musculaires localisées. Il est arrivé bien vite à reconnaître que des trois espèces d'électricité, la dernière, c'est-à-dire l'électricité d'induction, est celle qui convient le mieux à l'électrisation musculaire, surtout quand cette opération doit être longue et fréquemment pratiquée. Les courants induits peuvent en effet provoquer les plus fortes contractions musculaires sans exciter en même temps la sensibilité cutanée, sans produire de commotions, sans déchirer les vaisseaux capillaires, sans occasionner, comme l'électricité ordinaire des machines, tous

ces accidents, contre lesquels il est quelquefois difficile de réagir. Ils peuvent agir avec une grande puissance physiologique sans risquer d'altérer les tissus, comme le fait l'électricité voltaïque par l'effet de ses propriétés chimiques, propriétés qui sont presque nulles dans les courants induits, soit parce qu'ils sont instantanés, soit parce qu'ils sont en général dirigés alternativement en sens contraires. M. Duchenne en conclut, à la suite d'un grand nombre d'essais, que l'électricité induite est essentiellement l'électricité médicale.

Quant au mode d'opérer il peut avoir lieu de deux manières, soit en concentrant l'action électrique dans les plexus ou dans les troncs nerveux qui la conduisent aux muscles placés sous leur dépendance, soit en dirigeant cette action sur chacun des muscles ou sur chacun de leurs faisceaux. Dans ces différentes opérations, les électrodes doivent toujours être aussi rapprochés que possible. Le premier cas produit des mouvements d'ensemble, c'est l'électrisation musculaire indirecte; le second donne des mouvements partiels, c'est l'électrisation musculaire directe. L'électrisation indirecte exige la connaissance exacte de la distribution et des rapports anatomiques des nerfs; elle est très-simple sur les membres où la plupart des troncs nerveux sous-cutanés, dans un point de leur extrémité, sont accessibles aux excitateurs; elle est plus difficile et plus délicate dans d'autres régions. L'électrisation directe, qui consiste à faire contracter individuellement chaque muscle ou chaque faisceau musculaire en plaçant les électrodes humides sur les points de la peau qui correspondent à leur surface, est très-facile, surtout dans les régions superficielles du tronc et des membres, si l'on possède des connaissances anatomiques, et surtout celle de l'anatomie des surfaces. Elle offre plus de difficultés pour les muscles des régions profondes des membres, quoique la plupart d'entre eux présentent, sous la peau, un point de leur tissu musculaire par lequel ils sont accessibles à cette excitation directe.

On doit avoir soin de ne jamais administrer aux muscles qu'une dose d'électricité proportionnelle à leur degré d'excitabilité que M. Duchenne croit être variable pour chacun d'eux;

point qui lui a été contesté et qu'il est très-difficile d'établir, puisque l'excitation plus ou moins vive d'un muscle ne dépend pas seulement de son degré d'excitabilité, mais de la résistance plus ou moins grande que l'électricité rencontre pour parvenir jusqu'à lui. Quoi qu'il en soit, il est important de pouvoir graduer la quantité d'électricité employée; aussi est-il nécessaire que l'opérateur ait une main libre prête à agir sur le graduateur de l'appareil pendant l'électrisation, tandis que l'autre main tient les électrodes au moyen de manches isolants et les manœuvre facilement. Il faut toujours les placer au niveau de la masse charnue des muscles, et non au niveau de leurs tendons, car l'excitation de ces derniers ne peut produire la contraction musculaire. Plus un muscle est épais, plus le contact doit être parfait, sans cela les fibres superficielles sont seules excitées; chez les sujets très-gros cela est surtout nécessaire. M. Duchenne s'est assuré que plus les appareils sont puissants, plus l'électricité pénètre profondément. Ainsi, il a vu dans des cas de paralysie saturnine, où certains muscles de la région postérieure de l'avant-bras sont atrophiés et ne se contractent pas sous l'influence des courants induits, les muscles situés au-dessous de ces muscles paralysés entrer en contraction si les courants sont assez forts pour les traverser et pénétrer jusqu'à ceux qui sont sains. Les excitateurs, soit électrodes humides, n'étant en rapport qu'avec la face externe des muscles, et les filets nerveux n'arrivant à ceux des régions superficielles que par leur face intérieure, on est certain que les contractions musculaires n'ont pas lieu par l'intermédiaire des filets nerveux. A la face, l'électrisation partielle des muscles est plus difficile à cause des ramifications nombreuses des nerfs qui s'entrecroisent; on peut cependant les éviter, car on est averti par la contraction simultanée de plusieurs muscles, que l'électrode a porté sur l'un des rameaux nerveux; alors on place l'électrode un ou deux millimètres plus haut ou plus bas, et on le maintient toujours sur la direction du muscle à électriser. Il faut une connaissance exacte de l'anatomie pour éviter ces filets nerveux, et c'est ce qui a permis à M. Duchenne de limiter l'action électrique dans chacun des muscles du visage et de produire les jeux de physio-

nomie les plus variés[1]. Comme l'excitabilité de la sensibilité électrique est très-vive dans les muscles de la face, ce qui est dû, ainsi que nous l'avons vu, à la cinquième paire qui leur envoie des filets nerveux, on doit éviter de placer les électrodes sur les points correspondants à ces filets; car il en résulterait une douleur très-aiguë qui retentirait dans plusieurs points de la face et même du cerveau. M. Duchenne a fait une étude approfondie de l'excitabilité électrique des muscles au point de vue de la contractilité et de la sensibilité; c'est au moyen de cette étude qu'il est parvenu à posséder l'art de faire contracter isolément et exactement chacun des muscles ou de leurs faisceaux; mais, pour arriver à ce point de perfection, il faut une très-grande habitude et être initié à une foule de détails minutieux; ainsi, par exemple, il existe pour chacun des muscles un point anatomique dans lequel les électrodes doivent être placés de préférence, pour obtenir la contraction complète et isolée de ces muscles; et c'est ce point qu'il est essentiel de déterminer pour chaque muscle en particulier.

Nous avons vu qu'en employant les précautions indiquées, on peut faire parvenir l'électricité aux muscles à travers la peau sans que celle-ci soit affectée, et que les courants d'induction sont la forme la plus favorable de l'électricité pour atteindre ce but; mais il est des cas où il importe au contraire de porter l'électricité sur la peau. M. Duchenne estime que pour l'électrisation cutanée, quoique les courants voltaïques puissent être employés avec avantage dans quelques cas, l'électricité induite qui respecte les tissus est encore ici bien préférable. Les différences d'excitabilité électro-cutanée des diverses parties du corps nécessitent l'emploi de différents procédés d'électrisation cutanée au nombre de trois. Le premier mode est l'électrisation cutanée par la *main électrique;* on se sert d'un électrode humide, une éponge renfermée dans un cylindre métallique qui communique avec un des pôles de l'appareil et qu'on place

[1] Il a réussi, en faisant contracter ainsi successivement et isolément les différents muscles de la face, à déterminer le rôle de chacun d'eux dans les diverses expressions de la physionomie.

sur un point très-peu excitable de la surface du corps; l'électrode qui communique avec le second pôle est tenu dans l'une des mains de l'opérateur qui passe rapidement la face dorsale de sa main libre sur les points qu'il veut exciter, après avoir desséché la peau du malade à l'aide d'une poudre absorbante (poudre de lycopode ou de riz). Le second mode est l'électrisation cutanée par les *corps métalliques pleins*, cylindriques ou coniques, qu'on promène plus ou moins rapidement sur les parties malades après les avoir mis respectivement en communication avec les pôles de l'appareil. Le troisième mode est l'électrisation cutanée par les *fils métalliques;* ces fils sont employés sous forme de vergette ou de balais enfermés dans des cylindres qui sont tenus par des manches isolants; tantôt on parcourt, avec ces fils qui servent d'électrodes aux courants, la surface malade; tantôt on frappe légèrement la peau avec leurs extrémités, ce que M. Duchenne appelle la *fustigation électrique;* tantôt on laisse les fils en place aussi longtemps que le malade peut les supporter: ce dernier procédé, qui est rarement supporté par les malades, peut être désigné sous le nom de *moxa électrique*. Les trois procédés diffèrent notablement quant à leur degré d'énergie et aux sensations qu'ils développent; ainsi l'application de la main électrique ne produit de sensation un peu vive qu'à la face, et cette sensation est celle d'une brosse rude qui déchire la peau. Les électrodes métalliques pleins agissent plus fortement que la main électrique; mais ils sont aussi impuissants sur plusieurs parties du corps, en particulier sur les mains et sur la plante des pieds. Les fils métalliques augmentent dans une proportion énorme la puissance de l'électrisation sur la sensibilité de la peau; lorsqu'on les laisse en place, ils occasionnent une sensation semblable à celle qui serait produite par des aiguilles brûlantes enfoncées dans les tissus; au dire des malades rien n'égale la sensation produite par ces fils, pas même le feu tel qu'on l'applique par le moxa ou la cautérisation transcurrente.

L'électrisation des organes internes a été un objet de longues recherches de la part de M. Duchenne, qui a dans ce but donné des formes plus ou moins variées aux conducteurs

destinés à porter le courant dans ces organes; mais c'est surtout à l'électrisation des organes des sens qu'il a apporté un soin tout particulier en indiquant les moyens à employer et les précautions à prendre pour opérer dans ces cas. Nous y reviendrons un peu plus loin en nous en occupant au point de vue thérapeutique. Nous nous bornerons seulement à une remarque relative à l'effet différent, soit *différentiel*, comme l'appelle M. Duchenne, des deux courants d'induction sur l'organe de la vue.

Nous avons déjà dit que M. Duchenne avait trouvé que dans la machine à induction, l'extra-courant, c'est-à-dire celui qui est produit dans le fil inducteur au moment de la rupture du circuit, ne jouissait pas des mêmes propriétés que le courant induit dans le second fil. Ce dernier non-seulement agit plus puissamment sur la rétine, mais aussi excite plus vivement la sensibilité de la peau et pénètre plus profondément dans les tissus que l'extra-courant, lequel au contraire excite plus vivement la sensibilité et la contractilité des muscles et de quelques organes sous-cutanés. La différence entre les propriétés physiologiques et thérapeutiques des deux courants est telle qu'on ne doit pas employer indifféremment l'un ou l'autre dans la pratique. Nous avons déjà indiqué que cette différence tient essentiellement à ce que le courant induit proprement dit est produit dans un fil beaucoup plus long et plus fin que l'extra-courant, ce qui fait qu'il a plus de tension; qu'en outre il est plus instantané en général, et enfin qu'il est composé de deux courants dirigés alternativement en sens contraires, tandis que l'extra-courant ne se compose que d'un seul courant induit dirigé toujours dans le même sens. Les diverses expériences de M. Duchenne s'expliquent très-bien sans aller chercher ailleurs la cause des effets différents des deux espèces de courants. Ainsi, il trouve qu'en se servant de l'hélice à fil long et fin, pour conduire le courant, l'extra-courant qui est produit dans ce cas n'a plus les propriétés des courants induits dans cette même hélice quand elle est sous l'influence d'une hélice à fil gros, qui est traversée par le courant de la même pile; cela tient à ce que dans le premier cas le courant inducteur est tellement affaibli que l'extra-courant est lui-même peu

puissant; tandis que dans le second cas, la force du courant inducteur devenant beaucoup plus considérable à cause de la conductibilité meilleure de son circuit, le courant induit auquel il donne naissance est énergique en même temps qu'il a beaucoup de tension, à cause de la longueur et du petit diamètre du fil dans lequel il est développé. Cette différence entre les hélices explique aussi pourquoi le trajet à travers une même quantité d'eau affaiblit beaucoup plus l'extra-courant que le courant induit. Il faut faire extrêmement attention, dans les questions de cet ordre, à tenir compte de toutes les parties d'un circuit. Ainsi, lors même qu'on a rendu deux courants égaux au moyen d'une certaine résistance interposée dans leur circuit et différente pour chacun d'eux, il n'en résulte pas du tout qu'ils soient aptes à surmonter la même résistance. Nous croyons que c'est faute d'avoir apprécié toutes ces circonstances, que M. Duchenne a cru trouver une différence spécifique entre les deux sortes de courants induits, différence qui ne tient, comme toutes celles qui existent entre les courants, qu'à ce que l'un des courants, l'extra-courant, est plus fort en quantité, et l'autre, le courant induit, plus fort en intensité, soit en tension. Ajoutons que le courant induit proprement dit se compose de courants dirigés alternativement en sens contraires, circonstance qui joue un rôle important dans son action physiologique, et qui peut, en partie du moins, contribuer à la différence d'effets observée par M. Duchenne.

Ce n'est pas seulement le fait d'être dirigés alternativement en sens contraires, qui donne aux courants induits certaines propriétés particulières; mais la rapidité plus ou moins grande avec laquelle ils se succèdent exerce, indépendamment de leur direction, une très-grande influence sur leur effet physiologique. La vitesse des intermittences contribue à augmenter l'étendue de la contraction musculaire, parce que les fibres musculaires ne se relâchant que peu ou point dans l'intervalle des contractions, chaque excitation raccourcit de plus en plus le muscle; mais cette vitesse n'influe nullement sur l'énergie de la contraction qui ne dépend que de l'intensité du courant. Qu'on fasse contracter, par des intermittences alternativement rares

et rapides, un muscle paralysé dont l'irritabilité est intacte, par exemple le fléchisseur des doigts, et qu'on attache un poids à l'extrémité des doigts mis en mouvement par la contraction de ce muscle, l'on verra que les intermittences rapides ne donnent pas à ce muscle la force de soulever un poids plus lourd que les intermittences rares. Mais si l'intensité de la contraction musculaire n'est pas augmentée par la rapidité plus ou moins grande des intermittences, il n'en est pas de même de la sensation qui devient des plus douloureuses, presque tétanique, quand la vitesse est considérable; cette vitesse augmente aussi la puissance tonique des muscles et elle peut, lorsqu'elle est longtemps prolongée, aller jusqu'à produire la contracture. La contraction musculaire et la sensibilité électro-cutanée augmentent également d'une manière notable avec la rapidité des intermittences, indépendamment de l'intensité propre des courants qui se succèdent. Il résulte de ce qui précède que l'emploi des intermittences rapides est précieux dans bien des cas : d'abord quand il s'agit de l'étude de l'action individuelle des muscles, parce que les intermittences rapides peuvent produire des contractions artificielles qui imitent parfaitement les mouvements volontaires, tandis qu'avec les intermittences lentes on ne peut avoir de contractions musculaires sans tremblement, ce qui, par exemple, empêche lorsqu'il s'agit de la face, d'observer exactement l'influence que l'action individuelle des muscles exerce sur l'expression du visage. La faculté que possèdent les courants qui se succèdent rapidement d'agir plus fortement sur la sensibilité musculaire, trouve encore d'heureuses applications thérapeutiques dans les cas assez fréquents où les muscles ont perdu leur sensibilité; il en est de même pour les cas d'insensibilité de la peau; les courants induits, même les plus intenses, sont impuissants contre ces anesthésies, s'ils ne se succèdent pas avec une grande rapidité. Enfin M. Duchenne a encore utilisé de la manière la plus heureuse en thérapeutique la propriété que possèdent les courants d'induction rapides, d'augmenter la puissance de la tonicité musculaire, cette force qui ne sommeille jamais, qui, dans

l'absence des contractions volontaires, constitue la physionomie de la face, maintient les muscles dans leur attitude naturelle et qu'on peut comparer à la force d'un ressort qui, si elle venait à diminuer ou à augmenter, dérangerait le mécanisme le mieux combiné. Enfin l'expérience a montré que l'emploi des courants à intermittences rapides est nécessaire au traitement des atrophies musculaires, qu'elles soient ou non compliquées de paralysie.

Il est par contre des cas où les intermittences rapides pourraient être dangereuses; par exemple, lorsqu'à la suite de paralysies cérébrales il s'agit de rendre à des membres paralysés leur aptitude motrice, on risquerait, avec des courants trop intenses ou se succédant trop rapidement, d'exciter trop vivement la sensibilité générale et d'exposer ainsi le malade aux plus graves accidents. Quand bien même l'état des centres nerveux n'indiquerait pas d'éviter l'emploi des intermittences rapides, il n'est pas indifférent d'opérer l'électrisation avec ou sans douleur; car il y a des personnes, telles que les femmes et les enfants, qui, soit par défaut d'énergie, soit en raison de leur excitabilité nerveuse, ne peuvent la supporter; il faut donc avoir égard à cette circonstance pour modérer la rapidité des intermittences. Il est enfin des circonstances où l'application d'un très-petit nombre d'intermittences isolées est seule nécessaire, comme lorsqu'il s'agit d'exciter la membrane du tympan en cas de surdité, etc.

On voit donc que, de même qu'il importe de munir les machines d'induction d'un appareil destiné à graduer l'intensité des courants, de même il est indispensable de pouvoir faire varier à volonté le nombre des intermittences dans un temps donné. Sous ce point de vue, l'emploi d'une roue dentée qu'on manœuvre à la main est préférable au trembleur qui marche tout seul; aussi M. Duchenne se sert-il des deux procédés également pour rendre le courant discontinu, faisant usage, suivant les cas, de l'un ou de l'autre. Avec les machines magnéto-électriques, dans lesquelles la pile est remplacée par un aimant permanent, la rapidité avec laquelle on fait tourner les armures devant l'aimant détermine

directement celle avec laquelle les courants induits se succèdent.

Après cet examen de la méthode d'électrisation imaginée par M. Duchenne, nous devrions peut-être suivre son inventeur dans l'application qu'il en fait à l'étude physiologique des différents muscles de l'organisme, mais cette analyse nous conduirait beaucoup trop loin. Nous devons donc nous borner à une remarque importante, c'est que l'exploration électro-musculaire seule, tout en faisant connaître exactement l'action propre du muscle, apprend rarement quels sont ceux dont le concours lui est nécessaire pour obtenir le mouvement physiologique qu'il est destiné à exécuter, et sans lesquels il ne produirait le plus souvent que des accidents et des difformités; il faut y joindre l'observation pathologique qui enseigne quels sont les troubles qui surviennent dans les mouvements exécutés par un muscle en conséquence du défaut d'action synergique d'un ou de plusieurs autres muscles. C'est en opérant ainsi ce contrôle mutuel de l'expérimentation électro-physiologique et de l'expérimentation électro-pathologique, que M. Duchenne est parvenu à déterminer le rôle individuel de chaque muscle ainsi que la part des autres muscles dans l'action de chacun, et qu'il paraît avoir ainsi trouvé la clef de l'action musculaire synergique.

En se livrant à ces explorations musculaires, *véritables autopsies faites sur le vivant*, M. Duchenne est parvenu à découvrir l'existence assez fréquente d'atrophies musculaires, qui étaient confondues avec les paralysies ordinaires; ce sont principalement les faits pathologiques de ce genre observés dans toutes les régions, et sous les formes les plus variées, qui lui ont permis d'analyser avec le plus grand soin les fonctions des muscles de la main, de l'épaule, du diaphragme et de la face, et qui lui permettront d'étendre ses travaux électro-physiologiques aux muscles des autres régions. Un ordre de faits nouveaux et très-curieux, auxquels l'application de l'électrisation localisée a conduit M. Duchenne, est relatif à l'influence de la contractilité électro-musculaire et de la sensibilité musculaire sur les mouvements volontaires. Ainsi il a vu des muscles se contracter par la volonté, alors qu'ils avaient perdu la faculté d'entrer en action par l'excitation électrique; d'autres

fois il a vu des muscles que la volonté pouvait mettre en mouvement lorsqu'elle était aidée par la vue, rester dans l'inertie la plus complète quand l'action des yeux faisait défaut; phénomène dû, suivant M. Duchenne, à la perte de cette propriété musculaire qu'il a appelée, comme nous l'avons déjà dit, *conscience musculaire*.

Nous ne devons pas dissimuler que quelques objections graves ont été faites à certaines parties du système de M. Duchenne. Les principales sont celles de M. Remack, qui n'est pas disposé à admettre la distinction établie par M. Duchenne entre l'électrisation directe des muscles et leur électrisation indirecte par l'intermédiaire des filets nerveux, ne croyant pas que le muscle soit susceptible de se contracter par l'action immédiate de l'électricité, point que nous avons déjà eu occasion de traiter en détail [1]. Ce physiologiste croit que le *point* anatomique particulier pour chaque muscle sur lequel les électrodes doivent être placés pour produire une contraction complète, n'est pas relatif à la direction des fibres musculaires, mais bien aux rameaux nerveux placés dans le muscle et qu'il s'agit d'introduire dans le circuit; ces points seraient les points latéraux des muscles, soit points d'entrée des nerfs moteurs; de ces points, en leur appliquant l'un des électrodes, on peut commander avec sûreté aux muscles pendant que l'on place l'autre électrode sur l'une ou l'autre ramification intérieure nerveuse. Nous ne suivrons pas M. Remack dans les recherches au moyen desquelles il appuie son opinion tout en admettant les faits observés par M. Duchenne, qu'il interprète seulement d'une autre manière. Il arrive à conclure qu'il faut connaître les points des bords des muscles, c'est-à-dire les points d'entrée des nerfs, pour électriser les muscles d'après un plan et suivant un but déterminé; cette connaissance peut s'acquérir par l'anatomie, et même au moyen de l'électrisation localisée. Ce serait sortir des limites d'un ouvrage de la nature de celui-ci que d'entrer dans le détail des discussions soulevées entre M. Duchenne et M. Remack, soit sur l'objet même que nous venons de traiter, soit sur les questions relatives à l'irritabilité hallé-

[1] Tome III.

rienne[1] et la sensibilité musculaire, M. Duchenne continuant à admettre l'existence de cette irritabilité contre M. Remack qui la conteste, et persistant dans la distinction entre ces deux méthodes d'électrisation : l'une directe sans l'intermédiaire des nerfs, l'autre indirecte au moyen de l'excitation électrique des rameaux nerveux.

M. Remack, suivant une toute autre direction que M. Duchenne, conduit par les expériences de Nobili, de Matteucci et de M. Eckhard sur l'influence paralysante que dans la grenouille le courant voltaïque continu exerce sur un nerf moteur placé dans le circuit, avait trouvé que l'électrisation par un courant continu des nerfs moteurs dans l'homme, mettait en jeu les propriétés toniques des nerfs et des muscles antagonistes. Il était arrivé à croire, à la suite de nombreuses expériences, que les contractions toniques ou continues qui surviennent dans un membre pendant le passage d'un courant continu à travers un tronc nerveux, soit dans les muscles antagonistes, soit dans les muscles animés par ce nerf, sont de nature réflexe et peuvent par conséquent être produites aussi par l'excitation galvanique de certains nerfs cutanés. Il résulterait de là que l'excitation continue des fibres nerveuses sensibles, qui se produit, comme on le sait, par l'action du courant continu, peut se transmettre chez l'homme jusqu'aux centres nerveux et causer même des contractions continues des muscles qui sont en rapport avec les centres nerveux excités ainsi indirectement. A l'appui de cette idée, M. Remack a eu l'occasion, dans l'application des courants continus à la guérison des contractures, d'observer des phénomènes qui le forcèrent de supposer que la cessation des contractures n'est pas un fait purement périphérique, mais qu'elle est causée par une excitation des centres nerveux. Dans le cours d'un grand nombre de traitements, et en particulier de ceux des hémiplégies, il lui est arrivé de voir que la paralysie de la face ou de la langue, ou même la faiblesse intellectuelle étaient diminuées, quoique les courants voltaïques

[1] On désigne sous ce nom l'irritabilité dont on suppose que la fibre musculaire est douée, sous l'empire d'une action directe, et sans l'intervention d'aucun filet nerveux.

n'eussent été transmis qu'à travers les extrémités nerveuses. L'action du courant se transmettait donc jusqu'au centre nerveux, et il en résulterait, comme on le conçoit, des conséquences importantes pour la thérapeutique. Sans nier la possibilité de cette action réflexe, nous croyons qu'elle est beaucoup moins générale que ne le présume M. Remack, et que bien des phénomènes qu'il lui attribue sont simplement la conséquence d'une amélioration dans l'état des nerfs et des muscles soumis directement à l'action électrique, amélioration qui les rend plus susceptibles d'obéir à l'action émanée des centres nerveux eux-mêmes.

M. Duchenne, qui a fait aussi une étude assez détaillée de l'électrisation des extrémités nerveuses et de l'action réflexe, est arrivé à reconnaître que lorsque l'électrisation est bien localisée dans l'extrémité nerveuse, elle ne fait jamais entrer en contraction des muscles qui reçoivent des filets nerveux de nerfs placés au-dessus du point excité; mais que pour faire entrer en contraction ces muscles, il faut éloigner les électrodes l'un de l'autre, de manière à faire passer les courants, des terminaisons nerveuses dans les troncs nerveux, ce qui est une électrisation opérée par une sorte d'action réflexe. Cette électrisation se fait en général en mettant deux des extrémités de la personne, les deux mains ou les deux pieds, ou un pied et une main, chacun dans un bassin rempli d'eau où plongent les électrodes. L'électrisation par action réflexe agit en excitant les centres nerveux, un peu à la façon de la noix vomique ou des préparations analogues; cependant elle excite plus la sensibilité que la contractilité musculaire. M. Duchenne l'a en conséquence appliquée au traitement de certaines paralysies où l'on pouvait sans danger stimuler les centres nerveux; cependant il n'a pas eu à se féliciter en général de ce mode d'électrisation, qui expose quelquefois les malades à des douleurs profondes dans le trajet des nerfs dont les ramifications ont été excitées, douleurs qui ont souvent persisté sous forme de névralgies. Elle peut aussi donner lieu à des accidents graves lorsqu'il existe un travail inflammatoire vers les centres nerveux. M. Duchenne en cite un exemple remarquable, c'est celui d'un jeune homme de 22 ans qui, frappé d'une hémiplégie due à une

hémorrhagie cérébrale, avait cru, au bout d'un an qu'elle s'était à peu près dissipée, pouvoir faire cesser la contracture continue de quelques muscles, qui n'avait pas disparu entièrement, en produisant l'électrisation par action réflexe au lieu de limiter l'action électrique dans les muscles. En effet, il avait fait passer les courants induits de l'une de ses mains dans l'autre en saisissant les électrodes avec chacune d'elles. Sa vie fut plusieurs jours en danger, et il ne sortit de l'hôpital qu'après un long séjour, ayant conservé dans son côté droit des contractures plus fortes que celles qu'il avait voulu guérir.

§ 3. Examen des cas particuliers auxquels la thérapeutique électrique est applicable.

Maintenant que nous avons étudié d'une manière générale l'application des propriétés physiologiques de l'électricité à l'art de guérir, entrons dans quelques détails sur les cas particuliers dans lesquels cette application a été utilement réalisée, soit comme diagnostic, soit comme moyen thérapeutique, en cherchant à classer ces cas d'après les principes qui doivent servir de guide dans cette matière. Ces principes découlent de deux sources, l'une, l'expérience faite dans des cas pathologiques, l'autre les phénomènes physiologiques observés dans l'état normal.

Nous avons déjà dit que nous pouvions regarder comme démontré que l'électricité est le moyen de communication qui existe entre les centres nerveux et les muscles par l'intermédiaire des nerfs; nous avons réussi à déterminer l'état électrique naturel, soit des nerfs, soit des muscles, et la modification que cet état subit quand il y a action des centres à la périphérie, et de la périphérie aux centres. Cette modification consiste dans un déplacement moléculaire des particules des muscles et des particules des nerfs, analogue à celui qui s'opère dans les corps conducteurs, et en particulier dans les électrolytes tels que l'eau, quand ils transmettent un courant électrique; déplacement en vertu duquel les particules sont polarisées, c'est-à-dire se trouvent avoir leurs pôles semblables, tous tournés dans une même direction. L'existence de cette propriété

dans le nerf et dans le muscle suppose qu'à l'état sain, ces deux portions du corps animal ont leurs particules douées d'une grande mobilité, de façon qu'elles puissent facilement obéir aux forces capables de troubler l'équilibre naturel dans lequel elles se trouvent sous l'empire de la force vitale, pour leur imprimer la disposition nécessaire à l'accomplissement de leurs fonctions. Si nous examinons quelles sont les causes qui peuvent empêcher, dans l'état anormal de maladie, cet accomplissement d'avoir lieu, nous ne pouvons trouver que les suivantes : ou un état maladif du muscle qui gêne le mouvement de ses particules, de façon qu'elles ne peuvent obéir à l'action du nerf; ou une maladie et lésion du nerf qui empêche la communication du centre nerveux au muscle, ou du muscle au centre nerveux, de s'opérer régulièrement, état anormal qui peut également exister dans la liaison des dernières ramifications nerveuses avec les muscles; ou, enfin, une maladie des centres nerveux eux-mêmes d'où émane la force qui, à travers les nerfs, va atteindre les muscles, ou auxquels parvient l'impression qui part des extrémités. On conçoit déjà d'avance que dans ce dernier cas l'application de l'électricité doive présenter peu de chances de succès, puisque ce n'est pas le mode de communication qui manque entre les centres nerveux et la périphérie, mais la possibilité de mettre en activité ce mode de communication, point sur lequel nous ne pouvons avoir que des idées tout à fait problématiques[1]. Par contre on peut croire

[1] M. Jacubowitsch vient de communiquer récemment à l'Académie des sciences de Paris, par l'organe de M. Flourens, l'extrait de travaux qu'il a faits sur les centres nerveux, desquels il résulte que tout le système nerveux cérébro-spinal (la moelle épinière, la moelle allongée, les corps quadrijumeaux, le cerveau et le cervelet), et tout le système ganglionnaire, consistent d'une manière générale en trois espèces d'éléments nerveux : les cellules du mouvement, les cellules de la sensibilité, les cellules ganglionnaires ; il faut y joindre les cylindres d'axe de toutes ces cellules ; le système nerveux ganglionnaire ne constitue pas un système à part ; il appartient essentiellement au système cérébro-spinal. Les différentes cellules sont les racines des nerfs de même nature qu'elles. Tous les nerfs issus du cerveau, du cervelet, de la moelle épinière et de la moelle allongée sont, d'après leur origine, de nature mixte, et ils renferment des filaments provenant des différentes cellules en plus ou en moins grande proportion, de sorte qu'il s'y trouve des fi-

que, si le défaut se trouve dans l'incapacité du nerf de transmettre en se polarisant, l'impression émanée du centre nerveux ou de la périphérie, on puisse, à moins de lésions trop graves, lui rendre son aptitude naturelle en la développant artificiellement par un courant électrique d'une intensité et d'une direction convenables. De même, on doit penser qu'en faisant contracter le muscle au moyen de l'électricité, on parvienne à restituer à ses particules cette mobilité et cette élasticité nécessaires pour la contractilité volontaire. Nous allons voir, par l'examen des résultats qu'ont obtenus les praticiens, jusqu'à quel point sont fondées les déductions logiques que nous venons de tirer de l'étude que nous avions faite des phénomènes électro-physiologiques.

On peut résumer sous trois chefs principaux les cas où l'emploi médical de l'électricité est indiqué : 1° rétablir la contractilité dans les muscles qui en sont privés lorsque la perte de la contractilité ne tient pas ou ne tient plus à des lésions encéphalo-rachidiennes ; 2° rétablir la sensibilité générale ainsi que la sensibilité spéciale des organes des sens, lorsqu'elles sont abolies ou simplement diminuées ; 3° ramener à leur type normal la contractilité et la sensibilité exagérées ou perverties. On comprend quelquefois sous un quatrième chef les cas où il

ments nerveux de mouvement, de sentiment ; les nerfs du grand sympathique ont leurs racines dans les cellules ganglionnaires. Un élément important, qui entre pour beaucoup dans l'édifice et dans la construction du système nerveux, c'est le système du tissu cellulaire, qui non-seulement réunit à la façon d'un ciment les éléments nerveux isolés, en forme des groupes qu'il relie aux différentes subdivisions du système nerveux, mais qui a encore une autre importance essentiellement fonctionnelle, attendu qu'il contient les vaisseaux sanguins, et qu'il sert par conséquent à la condition de la vie la plus importante, c'est-à-dire à la nutrition. En tuant subitement par des narcotiques, tels qu'acide prussique, nicotine, etc., on trouve que les éléments nerveux cellulaires sont entièrements détruits, ce qui ne peut s'expliquer que par une interruption soudaine de la nutrition, qui est produite par l'action du poison. Cette analyse expérimentale du système nerveux, que l'auteur poursuit dans l'examen détaillé qu'il fait des différentes parties de ce système, fait entrevoir la possibilité, dans certains cas pathologiques, de se servir de l'électricité pour agir sur les centres nerveux avec chance d'obtenir une amélioration ; en tout cas elle aura le mérite, du moins d'après le jugement du célèbre auteur de tant de belles découvertes physiologiques que nous venons de nommer, d'avoir fait faire un grand progrès à la physiologie expérimentale.

est utile de produire une révulsion cutanée, qui consiste dans une douleur superficielle produite sur la peau ainsi qu'une hyperémie capillaire également superficielle et passagère; l'électricité ne nous paraît dans ce cas agir qu'indirectement.

Les paralysies qui proviennent d'une lésion du cerveau ou de la moelle ne sont nullement susceptibles d'être traitées dans le principe par l'électricité, ainsi que nous l'avons déjà dit; tous les essais qu'on a faits sous ce rapport ont été parfaitement malheureux, et cela devait être. Mais il arrive souvent que lorsqu'une paralysie provenant d'une hémorrhagie cérébrale n'a pas fait succomber le malade, elle s'amende, une résorption s'opère, le foyer hémorrhagique se cicatrise; c'est le résultat de l'évolution naturelle de la maladie lorsqu'elle n'est pas compliquée par des rechutes, évolution qui exige un temps variable, mais toujours assez long. Quelquefois le mouvement revient complétement dans les muscles primitivement paralysés, avec la cicatrisation du foyer hémorrhagique, quelquefois le mouvement ne revient que très-imparfaitement, ou même point du tout. C'est alors que l'emploi de l'électricité est indiqué pour rendre à ces muscles la contractilité volontaire, d'autant plus qu'ils n'ont jamais perdu, même au début de la maladie, la contractilité électro-musculaire. C'est un fait établi par Marshall, constaté par M. Duchenne, puis par un grand nombre de médecins, et en particulier par M. A. Becquerel, que la contractilité électro-musculaire demeure intacte dans les muscles paralysés sous l'influence d'une hémorrhagie cérébrale. Ce fait démontre la vanité de ceux qui prétendent guérir des paralysies cérébrales à l'aide de l'électricité; car, enfin, que veulent-ils faire? Rétablir la contractilité musculaire, mais elle n'est pas anéantie; ce qui l'empêche d'être mise en action, c'est la lésion cérébrale que personne ne songe à guérir au moyen de l'électricité. Dans des paralysies récentes, tant que le travail de cicatrisation du foyer hémorrhagique n'est pas complétement terminé, l'application des courants électriques aux muscles paralysés est non-seulement inutile pour leur rendre le mouvement, mais peut être très-nuisible; on a vu souvent, en effet, sous l'influence de l'exci-

tation générale qui accompagne toujours l'emploi local de l'électricité, de nouvelles hémorrhagies cérébrales se produire. Quoique rien ne soit plus variable que la durée du temps nécessaire pour que le travail réparateur amène la cicatrisation complète du foyer hémorrhagique, on peut cependant fixer de six à huit mois cette durée, au bout de laquelle il faut se servir des courants électriques pour les muscles paralysés dont une inaction prolongée a diminué la contractilité électro-musculaire ; car ceux dans lesquels elle est restée intacte ne gagneront rien pour la contractilité volontaire s'ils l'ont perdue en totalité ou en partie, cette perte ne provenant pas de l'incapacité du muscle à se contracter. Mais dans le premier cas, qui est celui où la paralysie, après avoir cessé d'être symptomatique de la lésion organique centrale, s'est localisée dans les muscles, l'emploi de l'électricité sera utile en favorisant la tendance naturelle des muscles à reprendre une partie de leur mouvement. M. Duchenne remarque que, même alors, les résultats ne seront heureux qu'autant que le foyer hémorrhagique n'est plus marqué que par une cicatrice ; mais, si, après la résorption de l'épanchement, il reste un kyste un peu volumineux, ou si le cerveau a éprouvé une perte de substance considérable, alors l'électrisation localisée ne produit aucun résultat. Il serait important de pouvoir diagnostiquer, du moins approximativement, l'état du foyer hémorrhagique après le terme ordinaire de sa résorption, pour savoir s'il convient ou non d'appliquer l'électrisation localisée aux muscles qui sont restés paralysés. M. Duchenne, tout en reconnaissant qu'il est bien difficile de déterminer d'une manière exacte l'état et le degré de la lésion du cerveau, a trouvé cependant que les malades qui, six à huit mois après le début d'une hémorrhagie cérébrale, ont conservé une paralysie plus ou moins complète, mais sans la moindre contracture, ont été avec avantage traités par l'électrisation localisée ; ce qui prouve que l'hémiplégie consécutive à l'hémorrhagie cérébrale qui n'est pas compliquée de contracture, n'est plus entretenue après six mois de durée par la lésion centrale, mais qu'elle s'est localisée dans les muscles qui ont perdu leur aptitude motrice. C'est l'inverse, si l'hémiplégie

présente des phénomènes de contracture; dans ce cas, si la contracture des muscles est permanente, elle annonce un travail inflammatoire dans le cerveau, et il faut se garder de l'électrisation localisée. Il n'en est pas de même si les contractures sont passagères; on peut les faire cesser, ou du moins les diminuer, par une application prudente et bien dirigée de l'électricité. Mais c'est surtout dans les paralysies de la face et de la langue que cette prudence est nécessaire; cette double paralysie persiste quelquefois après la résorption de l'épanchement sanguin; non-seulement elle occasionne une distension des traits, mais les malades en éprouvent une grande gêne pour parler et pour manger. M. Duchenne l'a guérie très-heureusement par l'électrisation localisée; mais malheureusement dans trois cas sur dix cette électrisation a été accompagnée d'accidents cérébraux plus ou moins graves. Pour éviter ce danger, il faudrait pouvoir distinguer l'hémiplégie faciale de cause cérébrale de celle qui provient de la paralysie de la septième paire, laquelle peut être soumise sans le moindre inconvénient à ce mode de traitement, le seul le plus souvent capable de la guérir. Mais il est souvent difficile de distinguer les deux hémiplégies l'une de l'autre à cause de l'analogie qui existe dans leur apparence. Toutefois, lorsque les muscles paralysés conservent leur contractilité électrique intacte, il est évident que l'hémiplégie est due à une cause cérébrale; par contre quand l'orbiculaire des paupières est paralysé, on peut être certain que l'hémiplégie faciale ne peut être rapportée à une lésion du cerveau, et qu'elle dépend uniquement d'un état pathologique du nerf facial. Il existe encore d'autres indications plus indirectes, telles que pesanteur de tête, tournoiements, etc., qu'il ne faut pas négliger.

Quoi qu'il en soit, lors même que l'application de l'électricité est indiquée d'une manière qui semble positive, il faut la pratiquer avec beaucoup de précautions dans le traitement de la paralysie consécutive à l'hémorrhagie cérébrale. D'abord il faut éviter à tout prix l'électrisation par action réflexe; ainsi, non-seulement il faut se garder de faire passer le courant des extrémités aux centres nerveux, en leur faisant parcourir les nerfs

dans le sens de leur longueur, mais il faut même rapprocher autant que possible les électrodes dans l'électrisation localisée, pour que le trajet des courants électriques soit bien limité dans les organes eux-mêmes. Il faut en outre que les intermittences des courants soient éloignées les unes des autres ; car pour un certain degré de rapidité de ces intermittences, les sensations deviennent douloureuses et comme tétaniques, et il peut en résulter une excitation générale qui, en réagissant sur les centres nerveux, risque de provoquer une congestion, une nouvelle hémorrhagie, en un mot des accidents cérébraux. D'ailleurs comme le but ici est uniquement de provoquer le retour des mouvements volontaires en produisant des contractions musculaires artificielles, l'emploi des courants à rares intermittences est parfaitement suffisant. Il faut encore avoir soin d'exciter individuellement les muscles paralysés pour rappeler les mouvements d'une manière égale et pour rétablir l'équilibre des forces musculaires. Enfin il ne faut pas que les séances soient trop prolongées ni que la durée du traitement soit trop longue, vu que les muscles n'étant pas atrophiés et n'ayant pas souffert dans leur texture, on n'a autre chose à faire qu'à rétablir la contractilité volontaire. Si, après quinze ou vingt séances, les muscles ne paraissent pas recouvrer leurs mouvements, c'est que la cause de la paralysie siége encore ailleurs que dans les muscles, c'est-à-dire dans le cerveau. Il faut attendre, et une nouvelle tentative peut être plus heureuse que la première.

Nous ne nous arrêterons pas aux paralysies qui proviennent d'un ramollissement ou de tumeurs développées dans le cerveau; il est évident que les règles à suivre dans l'application de l'électricité, doivent être les mêmes que pour les paralysies dues à une hémorrhagie cérébrale; seulement, si dans le premier cas l'électrisation localisée peut notablement contribuer à l'amélioration des symptômes et à la récupération de tout ou partie des mouvements quand le ramollissement est arrêté ou en voie de cicatrisation, il est plus prudent de proscrire d'une manière absolue l'emploi de l'électricité dans la paralysie symptomatique d'une tumeur cérébrale, à cause du danger qu'on court par là de favoriser l'apparition ou le retour de conges-

tions sanguines autour de ces produits accidentels développés dans le cerveau.

Les paralysies symptomatiques des maladies de la moelle diffèrent en un point essentiel, suivant Marshall Hall, de celles qui sont symptomatiques des affections cérébrales, savoir, en ce que tandis que dans celles-ci la contractilité électro-musculaire demeure intacte, elle disparaît complétement dans les premières. M. Duchenne, tout en combattant le mode d'expérimentation du physiologiste anglais, qui en quelques points est défectueux, trouve bien cependant comme lui que dans les lésions de la moelle épinière l'irritabilité musculaire diminue du moins *presque toujours*, ce qu'on peut constater en portant successivement l'excitation électrique sur chacun des muscles paralysés. Malheureusement pour la généralité de la loi, M. Duchenne a trouvé un cas exceptionnel dans lequel la contractilité électro-musculaire était restée normale dans tous les muscles, malgré une lésion telle que la substance grise avait complétement disparu dans chacune des deux moitiés de la moelle et sur la ligne médiane, ainsi que le prouva l'autopsie du malade qui avait succombé plusieurs mois après, à une fièvre continue. Cependant dans tous les autres cas où il avait pu constater à l'autopsie une altération des autres parties de la moelle, M. Duchenne avait trouvé une altération correspondante de la contractilité électro-musculaire. M. A. Becquerel ne va pas même aussi loin que M. Duchenne, car il estime que, si la proposition de M. Marshall Hall est vraie en général, il y aurait de nombreuses distinctions à faire pour des cas particuliers. Il a trouvé en étudiant la contractilité électro-musculaire dans plusieurs cas de la maladie de la moelle, que le degré ou l'intensité de cette contractilité est en raison directe de la conservation du mouvement volontaire, de manière qu'elle ne disparaît d'une manière absolue que si la paralysie est complète et le mouvement volontaire tout à fait aboli.

Quant aux règles à suivre dans l'application de l'électricité aux maladies de la moelle, on ne doit pas y songer tant que le ramollissement chronique de la moelle n'est pas stationnaire ou en voie de cicatrisation, ce que l'on reconnaît à ce que les

symptômes de paralysie sont stationnaires ou décroissants. Même dans ces cas, cette application est inutile et peut être fâcheuse si la paraplégie reste complète et si la contractilité électro-musculaire est elle-même à peu près anéantie; lorsque la paraplégie est incomplète et la contractilité seulement diminuée, on peut avoir recours à l'électrisation localisée et exciter successivement les muscles des deux membres inférieurs. M. A. Becquerel conseille aussi comme traitement plus simple et exigeant des séances moins longues, des bains de pied électriques sous l'influence desquels la presque totalité des muscles inférieurs se contractent en même temps. Ces bains se donnent au moyen de deux petits baquets remplis d'eau salée tiède, dans chacun desquels un des pieds du malade est plongé, et qui communiquent respectivement avec les pôles de l'appareil d'induction. Les séances doivent être de dix à quinze minutes, et leur nombre doit toujours être considérable, car il faut, dans les paralysies symptomatiques des maladies de la moelle, continuer pendant un temps bien long l'emploi de l'électricité pour obtenir de bien légers résultats.

Après les paralysies qui proviennent d'une lésion du cerveau ou de la moelle, viennent celles auxquelles donne naissance la lésion matérielle d'un nerf de mouvement ou d'un nerf mixte. Une semblable lésion, si elle est d'une certaine intensité, peut avoir pour effet d'anéantir le mouvement et quelquefois même le sentiment, sur les muscles dans lesquels le nerf lésé se distribue. Bien des causes peuvent déterminer les lésions capables de produire un tel effet : les unes indirectes, provenant de maladies dans les nerfs, les autres plus directes, désignées sous le nom de lésions traumatiques, provenant d'accidents qui blessent ou coupent les nerfs. M. Duchenne a fait une étude toute particulière des paralysies dues à cette dernière cause dans les nerfs mixtes, qu'il a désignées sous le nom de paralysies traumatiques des nerfs mixtes.

Toute lésion traumatique d'un nerf mixte occasionne un trouble plus ou moins grand dans l'état de la sensibilité, des mouvements volontaires et de la nutrition des muscles qui sont sous la dépendance de ce nerf. Il est clair que, si toutes les

fibres du nerf ont été atteintes et désorganisées par la lésion, la contractilité électro-musculaire des parties correspondantes est anéantie, et il n'y a pas espoir de guérison par l'électricité; c'est comme si le conducteur qui doit amener le courant à un télégraphe électrique était totalement rompu, on aurait beau réparer l'appareil télégraphique, il n'en marcherait pas mieux; mais si le conducteur n'est que partiellement rompu, si l'accident qu'il a éprouvé est plus ou moins réparé, il y aura encore manifestation de signes à l'appareil télégraphique, pourvu qu'on ait soin de faire cesser l'état de détérioration dans lequel il a pu tomber par défaut d'usage ou par accident. Quand donc toutes les fibres d'un nerf n'ont pas été détruites, il peut se faire que la contractilité musculaire soit conservée partiellement ou intégralement, lors même que les mouvements volontaires sont anéantis; on peut espérer alors la guérison au moyen de l'électricité. Dans un cas cité par M. Duchenne, cas dans lequel, à la suite de la luxation d'une épaule, un homme éprouva une paralysie du membre correspondant avec atrophie des muscles du bras, de l'avant-bras, de la main, tous les filets nerveux avaient également souffert, car le membre entier était amaigri, tous ses mouvements étaient également abolis; d'où il était naturel de conclure que tous ses muscles étaient également affectés. Parmi les muscles, les uns avaient perdu leur contractilité électrique, ce sont ceux qui s'étaient atrophiés le plus rapidement; tandis que les autres muscles paralysés également, mais sans perte de la contractilité électrique, échappèrent à l'atrophie et recouvrèrent leurs mouvements volontaires après quelques séances d'électrisation localisée. Cependant, quoique la perte de la contractilité électrique dans certains muscles pût faire craindre que ces muscles fussent perdus à tout jamais, M. Duchenne ayant conclu de la sensibilité qu'accusait encore le malade quand on soumettait les mêmes muscles à l'action des courants induits, que la communication nerveuse n'était pas complétement interrompue, il ne désespéra plus de leur rendre leur vitalité sous l'influence de l'excitation électrique. Seulement il arriva qu'avant de retrouver leurs

mouvements et leur nutrition, ils éprouvèrent, sous l'influence du traitement, une surexcitation de la sensibilité (*hyperesthésie*) momentanée, phénomène qui, lorsqu'il se présente dans ce cas, peut donc être considéré comme un signe favorable. Voici donc la succession des phénomènes thérapeutiques tels qu'ils se manifestent sous l'influence de l'électrisation localisée dans les cas dont il s'agit[1]: 1° Retour rapide des mouvements volontaires dans les muscles qui n'ont pas perdu leur contractilité électrique; 2° exaltation de la sensibilité (hyperesthésie) dans les muscles dont la contractilité électrique a été profondément lésée et dont la sensibilité était seulement diminuée; 3° retour de la nutrition et ensuite des mouvements volontaires dans les muscles du bras, puis de l'avant-bras et enfin de la main. Il est évident que, sous l'influence de l'électrisation localisée, les nerfs sont peu à peu revenus à leur état naturel, de manière à pouvoir établir la communication, momentanément interrompue par l'effet de leur lésion, entre les centres nerveux et les muscles. La lenteur de la guérison pourrait peut-être faire croire qu'elle n'est que l'effet du temps; mais l'heureuse influence de l'électrisation localisée dans des cas semblables, où elle était intervenue très-tard et à une époque où la paralysie et l'atrophie étaient depuis longtemps stationnaires, montre l'utilité de cet agent thérapeutique, en même temps qu'il prouve que le temps est le plus souvent insuffisant, à moins que les nerfs n'aient été très-peu affectés et que les muscles aient perdu de leur contractilité électrique. Un fait assez extraordinaire, signalé par M. Duchenne, c'est qu'il est arrivé quelquefois que, sous l'action de l'électrisation localisée, des muscles ont repris leurs mouvements volontaires, leur force et leur nutrition avant de recouvrer leur aptitude à se contracter sous l'influence de l'excitation électrique. M. A. Becquerel n'est pas disposé à admettre ce dernier fait qu'il regarde plutôt comme une exception, sur la nature de laquelle il a même des doutes. Ce qui est plus positif, c'est que la lenteur de l'action thérapeutique de l'électrisation loca-

[1] M. Duchenne a obtenu les mêmes résultats dans plusieurs cas analogues.

lisée sur les muscles qui ont perdu leur contractilité et leur sensibilité électriques, tient à ce que, lorsque la lésion du nerf n'est pas guérie, l'influence du centre nerveux ne peut pas encore se communiquer librement aux muscles, et qu'alors l'effet de l'électricité sur eux, qui consiste essentiellement à leur rendre l'aptitude d'obéir à cette influence, ne peut évidemment pas se faire sentir encore. Sous ce rapport, l'électrisation localisée peut servir de diagnostic entre des muscles qui semblent être également paralysés; M. Duchenne a observé que ceux parmi ces muscles qui n'ont pas perdu leur contractilité électrique, peuvent retrouver leurs mouvements spontanément il est vrai, mais plus rapidement cependant par l'excitation électrique que par le seul effet du temps, tandis que ceux qui l'ont perdue commencent par s'atrophier et ne peuvent retrouver leur nutrition et leur mouvement que lorsque la lésion des nerfs étant guérie, ils sont capables de recevoir l'influence nerveuse; c'est alors seulement que le traitement électrique peut leur être appliqué avec succès.

Cette perte de la contractilité électrique permet de distinguer les paralysies qui tiennent à une lésion traumatique des nerfs de celles qui dépendent d'une cause cérébrale, dans lesquelles cette contractilité demeure intacte. M. Duchenne cite un exemple frappant de la justesse de ce diagnostic chez un malade où, malgré toutes les apparences contraires, il n'hésita pas à attribuer à une altération des nerfs qui se rendent aux muscles la paralysie qu'ils éprouvaient; or, un examen minutieux finit par constater une lésion au niveau de l'émergence des nerfs qui constituent les plexus cervical et brachial du côté droit; cette lésion locale était due à une exostose qu'on parvint à guérir, et avec elle la paralysie qui l'accompagnait. M. Duchenne cite encore d'autres faits à l'appui de l'exactitude de sa proposition dont il fait ressortir l'importance pour les cas où la cause de la paralysie n'est pas évidente, et où cependant une tumeur ou une exostose profondément cachée peut comprimer un tronc nerveux et produire lentement ou subitement des phénomènes de paralysie traumatique des nerfs mixtes, phéno-

mènes dont la nature n'est pas douteuse dans les cas ordinaires dans lesquels ils sont la conséquence de la section, de la contusion, de la commotion, de la compression ou de la distension des nerfs.

L'exploration électro-musculaire est donc le meilleur diagnostic pour les paralysies consécutives à la lésion traumatique des nerfs; la gravité de ces paralysies est en raison directe de l'affaiblissement de la contractilité et de la sensibilité électriques des muscles auxquels ces nerfs aboutissent; mais si la sensibilité est conservée ou simplement diminuée, lors même que la contractilité électrique est éteinte, cette gravité diminue. La contractilité électrique demeure entière dans les muscles qui n'ont pas souffert, mais qui se trouvent quelquefois paralysés par une sorte de solidarité nerveuse; cette intégrité de la contractilité électrique est un signe favorable, et ces muscles recouvrent rapidement leurs mouvements.

Lorsque la lésion traumatique d'un nerf est très-grave, soit par une division complète, soit par une perte de substance, on a pu croire que les paralysies qui en étaient la conséquence étaient incurables. Cependant M. Duchenne, qui avait longtemps partagé cette opinion et avait refusé dans ces cas d'appliquer l'électrisation, a reconnu plus tard que quoique très-graves, les cas de ce genre ne sont pas désespérés. Ainsi il a réussi à guérir une paralysie atrophique d'une main décharnée et privée de mouvement, paralysie qui était la conséquence de l'arrachement du nerf cubital, et qui datait de quatre ans. Il attribue ces heureux résultats à ce qu'un nerf peut se cicatriser quand il a été divisé, ou se régénérer quand il a perdu une partie de sa substance [1]. Il croit même, d'après une expérience curieuse de M. Claude Bernard [2], qu'à défaut de ses conducteurs natu-

[1] MM. Follin et Brown-Sequard ont constaté par des recherches microscopiques, que dans ces cas les fibres nerveuses se continuent, sans interruption, à travers la cicatrice. M. le docteur Prévost avait déjà fait la même observation en 1827, à la suite d'expériences très-intéressantes sur la régénération du tissu nerveux.

[2] M. Cl. Bernard ayant détruit dans le canal vertébral d'un chien toutes les

rels, l'influence nerveuse centrale peut à la longue se frayer une nouvelle route pour arriver aux organes privés de leurs nerfs propres, probablement au moyen de la solidarité qui semble exister entre les nerfs des organes rapprochés. Ne serait-il pas possible aussi que l'électrisation contribuât non-seulement à rendre aux muscles leur aptitude à obéir à l'influence nerveuse, mais qu'elle fût également capable de développer dans les nerfs leurs propriétés essentielles, quand ils les ont perdues à la suite des altérations qu'ils ont éprouvées, et à revivifier les ramifications nerveuses les plus délicates qui restent encore plus ou moins dans les muscles, lors même qu'ils semblent privés de toute substance nerveuse.

Sans nous étendre davantage sur le sujet intéressant qui vient de nous occuper, bornons-nous à résumer en deux points le principe qui doit servir de guide dans le traitement des paralysies consécutives à la lésion traumatique des nerfs : 1° que cette paralysie, lorsque la contractilité musculaire n'est pas abolie, doit être soumise le plus tôt possible au traitement d'électrisation localisée; 2° que lorsqu'au contraire cette contractilité est perdue, ou du moins insensible, il faut attendre que la lésion nerveuse soit guérie, c'est-à-dire de quatre à dix mois, avant d'appliquer l'électrisation. Chaque muscle doit être électrisé d'une manière spéciale; plus il a souffert dans sa constitution et dans sa contractilité, plus l'intensité du courant et la rapidité des intermittences doivent être considérables. M. Duchenne a observé que le meilleur moyen d'agir sur la contraction des muscles atrophiés, est d'exciter la sensibilité musculaire au moyen des intermittences rapides; seulement il faut diminuer leur fréquence et modérer le courant quand on voit la sensibilité s'exalter, de peur de provoquer des névralgies difficiles à réprimer et même quelquefois des accidents inflammatoires. Il ne faut pas non plus des séances trop longues, et il vaut mieux

racines sensibles dans une certaine étendue, de manière que leur régénérescence fût impossible, la perte de la sensibilité fut la conséquence de cette opération. Mais cette sensibilité revint progressivement, et un an après l'opération, l'animal paraissait jouir de sa sensibilité normale.

n'agir que très-peu de temps de suite sur le même muscle, une minute par exemple, quitte à revenir plusieurs fois dans une même séance, sur chacun des muscles, en laissant entre chaque excitation un temps de repos.

Parmi les paralysies consécutives à la lésion des nerfs, nous citerons encore celle qui constitue l'hémiplégie faciale; nous avons vu que cette hémiplégie peut être une conséquence d'une affection du cerveau; ce n'est pas celle-là dont il est question ici; il s'agit de l'hémiplégie faciale isolée, qui tient toujours à quelque affection morbide du nerf facial, telle qu'une petite hémorrhagie ou ramollissement très-circonscrits à l'origine même de ce nerf, ou dans son épaisseur, telle encore qu'une compression de ce nerf déterminée, soit par une congestion sanguine, produite sous l'influence d'un refroidissement, d'un courant d'air, soit par une tumeur siégeant quelque part, près de l'origine du nerf ou en dehors du crâne; la blessure du nerf, sa suture, sa destruction par des suppurations abondantes, par la gangrène, produisent également l'hémiplégie faciale isolée; quand l'hémiplégie faciale n'est pas le résultat de la compression du nerf facial par une tumeur, de sa blessure ou de sa destruction, il faut, lors même que la contractilité électro-musculaire est diminuée ou anéantie, essayer de la traiter par l'électricité localisée avec toutes les précautions que nous avons indiquées plus haut; ce n'est qu'en persévérant pendant deux ou trois mois au moins dans ce mode de traitement, qu'on pourra s'assurer si la paralysie est curable; dans quel cas, on obtiendra ou une guérison complète ou la persistance d'un certain degré de paralysie. Il est un troisième mode de terminaison que M. Duchenue a étudié avec beaucoup de soin, c'est la contracture, affection dont la gravité consiste en ce que les muscles qui en sont atteints peuvent se rétracter à la longue et amener une difformité incurable qui gêne beaucoup les mouvements; quand la contracture succède à la paralysie de la face après qu'on a commencé à employer contre elle l'électrisation, il faut en général l'interrompre. On est à peu près assuré d'éviter la contracture quand on voit les muscles dont la contractilité électrique a été plus ou moins abolie par la paralysie de la septième

paire, retrouver leur tonicité dans un certain ordre et d'une manière graduelle. C'est un point du reste sur lequel nous reviendrons à l'occasion des paralysies rhumatismales.

Outre les paralysies qui proviennent des lésions organiques dans les centres nerveux ou dans les nerfs, il en est d'autres dont la cause moins apparente est souvent difficile à discerner, mais à la guérison desquelles le traitement électrique n'en est pas moins applicable souvent avec succès. Nous citerons d'abord les paralysies *hystériques*, qui se présentent tantôt sous la forme de paraplégie, tantôt sous celle d'hémiplégie, tantôt sous celle de paralysie isolée d'un membre ou d'une partie d'un membre. Suivant M. Leroy d'Étioles, ces paralysies seraient dues à l'absence plus ou moins prolongée de l'*influx nerveux* (c'est ainsi qu'il désigne l'influence émanée des centres nerveux), après une dépense exagérée et rapide de cet agent. Mais cette explication, qui est en opposition avec plusieurs cas de guérison opérés par l'électricité, immédiatement après les attaques d'hystérie, ne saurait être admise; M. Valérius serait plutôt disposé à croire que ces paralysies sont dues à une déviation de l'influx nerveux qui serait détourné par la maladie d'un organe pour être porté sur un autre; il ne serait pas éloigné non plus de les attribuer à un trouble survenu dans l'état électrique des muscles paralysés, trouble qui consisterait dans l'affaiblissement de la polarité électrique naturelle de ces muscles, que l'électricité ferait disparaître. Ce qu'il y a de certain, c'est que les paralysies hystériques ne correspondent à aucune lésion appréciable du cerveau ou de la moelle épinière, et qu'elles sont liées avec un certain état nerveux particulier. Rien n'est plus irrégulier que leur début, leur marche et leur terminaison; elles se montrent tantôt lentement et progressivement, quelquefois subitement, mais presque toujours à la suite d'une impression nerveuse un peu vive; elles sont également variables, soit dans leur développement, tantôt faibles, tantôt intenses, disparaissant dans un point pour se montrer dans un autre, soit dans leur terminaison tantôt brusque tantôt lente. La contractilité électro-musculaire demeure toujours parfaitement intacte

dans tous les cas, et l'électrisation localisée est un moyen de guérison qui offre de grandes chances de succès, sauf dans les cas où la paralysie hystérique se présente sous forme de paraplégie. Il faut, dans cette paralysie, avoir soin de porter l'excitation électrique dans chacun des organes affectés, et continuer le traitement quelque temps après le retour des mouvements ou de la sensibilité, afin de fixer, pour ainsi dire, la guérison, car les organes résistent d'autant mieux aux rechutes auxquelles ils sont exposés à la suite des accès hystériques, qu'ils ont été plus souvent électrisés. M. Duchenne, à qui nous empruntons ces détails, ajoute cependant qu'il y a eu des cas où il a suffi d'une seule excitation électro-cutanée pour guérir la paralysie hystérique. C'est sans doute en allant exciter les centres nerveux par une sorte d'action réflexe que l'électrisation cutanée rappelle les mouvements dans les paralysies hystériques. Ce mode d'électrisation est surtout précieux quand la sensibilité cutanée est considérablement diminuée dans le cas qu'on a à traiter; cependant il est beaucoup plus douloureux que le traitement par l'électrisation musculaire; aussi ne faut-il l'employer qu'avec les malades qui peuvent le supporter. En général, la sensation produite par l'excitation électrique est tellement étrange, alors même qu'elle n'est pas douloureuse, que, pour éviter de provoquer des accès hystériques chez ceux qui l'éprouvent, il faut habituer graduellement les malades à cette sensation, en commençant par des doses très-faibles, et avec des intermittences éloignées. On arrive peu à peu à une électrisation localisée à intermittences rapides, qui est le meilleur mode qui convienne au traitement de la paralysie hystérique; mais il faut y renoncer quand il provoque des crises nerveuses, et le remplacer par l'électrisation musculaire à rares intermittences. Ajoutons cependant que quelques médecins, notamment M. A. Becquerel, estiment que dans les paralysies nerveuses, il faut n'avoir recours à l'électricité que lorsque les autres agents thérapeutiques ont échoué, et la réserver pour les cas où la paralysie est complète et déjà ancienne; il ne conteste pas, qu'avec de la persévérance, on ne puisse obtenir un résultat heureux.

Outre les paralysies hystériques, il est encore d'autres paralysies nerveuses sur lesquelles nous ne nous arrêterons pas; ce sont celles qui sont la conséquence de quelque affection, soit locale, soit générale, qu'a éprouvée le malade, telle que la chlorose, certaines fièvres graves, etc. Ces paralysies, qui sont en général désignées sous le nom d'essentielles, ont été souvent traitées avec succès par l'électricité; cependant il ne faut pas s'exagérer la portée, dans ces cas, de ce mode de traitement, car on a vu des paraplégies essentielles guéries quelquefois spontanément ou sous l'action des moyens thérapeutiques les plus divers; toutefois il est des cas bien constatés où ces paraplégies, qui avaient résisté à tous les agents thérapeutiques, ont cédé à l'application des courants électriques.

Les paralysies par *intoxication* appartiennent aussi à la catégorie de celles qui ne résultent d'aucune lésion des centres nerveux et des nerfs; parmi ces paralysies, la plus fréquente et la plus importante est la saturnine, qui affecte les malades qui sont sujets, par l'effet du métier qu'ils exercent, aux coliques de plomb. La paralysie saturnine, quoique pouvant frapper les muscles les plus différents, atteint cependant de préférence les extenseurs, et se porte en général sur les mains et sur les bras. Souvent elle est incomplète, et elle ne se manifeste que par une faiblesse plus ou moins grande des muscles; quand elle est complète, c'est une paralysie véritable et absolue. M. Duchenne regarde comme l'un des caractères les plus tranchés de cette paralysie, l'abolition de la contractilité électro-musculaire dans les muscles qui en sont affectés; M. A. Becquerel croit que cette abolition n'est complète que lorsque la paralysie l'est aussi, et que le degré de conservation de la contractilité électro-musculaire est en rapport direct avec le degré de conservation du mouvement volontaire. La remarque de M. Becquerel n'est point en contradiction avec l'allégation de M. Duchenne, qui observe lui-même que l'abolition de la contractilité musculaire n'est point générale, et qu'elle semble toujours se porter de préférence sur certains muscles, alors que le membre entier est frappé de paralysie. L'atrophie s'attaque principalement aux muscles qui ont souffert dans leur

contractilité électrique, quoique le membre frappé de paralysie soit généralement amaigri. Ces muscles sont les seuls qui, en réalité, aient subi l'influence délétère de l'intoxication saturnine. Les autres muscles du membre paralysé souffrent peu dans leur nutrition, et recouvrent très-vite leur force et leurs mouvements volontaires sous l'influence du traitement [1]. Quoi qu'il en soit, l'application de l'électrisation localisée présente de grandes chances de guérison, surtout dans les paralysies incomplètes, et même elle réussit quelquefois dans les complètes, alors qu'ont échoué les traitements les plus énergiques. Il importe, dans le traitement électrique, de commencer par constater l'état exact de tous les muscles paralysés, au moyen soit de l'exploration électro-musculaire, soit d'autres signes diagnostiques, qui exigent qu'on connaisse bien l'action individuelle de ces muscles. Ce qui rend importante la connaissance exacte du degré de lésion des muscles, c'est que l'excitation électrique doit être portée dans chacun d'eux à une dose d'autant plus forte et pendant un temps d'autant plus long, qu'ils sont plus profondément lésés. Le traitement de la paralysie saturnine est en général très-long et exige de trente à cent séances; il faut pratiquer l'électrisation de façon à exciter des sensations douloureuses, parce que le courant doit être à intermittences rapides, aussi intense que possible, et dirigé principalement sur

[1] M. Duchenne a eu l'occasion de confirmer l'exactitude de son assertion par l'autopsie d'un homme qui, pendant près de vingt ans, avait conservé une paralysie saturnine de quelques muscles de la région postérieure de l'avant-bras. Ces muscles, pendant la vie, ne se contractaient pas par l'excitation électrique, tandis que ceux de la partie antérieure de l'avant-bras jouissaient de toutes leurs propriétés, quoique leur force fût très-diminuée et qu'ils fussent aussi atrophiés. A l'autopsie les premiers muscles, ceux dans lesquels la contractilité électrique n'existait plus pendant la vie, étaient d'un jaune pâle; examinés au microscope, ils furent trouvés transformés en graisse; les muscles de la région antérieure, au contraire, étaient restés à l'état normal. Ce n'est cependant qu'après plusieurs années que les muscles paraissent commencer à s'altérer dans leur texture. Quant à la nature de cette altération, elle nous semble être due à la présence d'une certaine quantité de plomb dans le sang, qui doit suffire pour ôter avec le temps au muscle qui reçoit ce sang ses propriétés normales et sa vitalité.

les muscles dont la contractilité et la sensibilité électriques sont le plus affaiblies. Il faut également agir sur des muscles atrophiés, et le courant rapide est celui qui exerce le plus d'influence sur la nutrition musculaire, en même temps qu'il rappelle le mouvement volontaire. Les séances ne doivent pas durer plus de dix minutes, et il faut les répéter en général de deux jours l'un. On peut joindre avec avantage au traitement de l'électrisation localisée, les bains sulfureux, la strychnine à l'intérieur, la gymnastique nerveuse[1], et le massage.

Il nous paraît résulter du diagnostic et du traitement des paralysies saturnines, que ces paralysies proviennent essentiellement de l'altération des muscles, altération qui doit s'étendre aux ramifications nerveuses qu'ils reçoivent, et non d'un état morbide des centres nerveux; non-seulement cette altération est visible, comme nous l'avons fait remarquer plus haut, mais elle nous semble constatée par le fait que le muscle n'est plus capable de se contracter sous l'action directe d'un courant électrique, incapacité qu'il ne présenterait pas s'il était sain. La même remarque s'applique aux autres cas de paralysie par intoxication, qui du reste présentent des symptômes analogues et peuvent être traités de la même manière. Toutefois il serait possible que dans tous ces cas, l'altération des muscles ne fût pas un effet direct de l'action des poisons, mais le résultat indirect de leur action sur les nerfs.

Nous en disons autant des paralysies *rhumatismales*, qui tiennent évidemment à une modification du tissu musculaire, telle que le muscle ne peut plus se contracter. Cette modification se manifeste par l'abolition du mouvement, qui est la conséquence de la douleur très-vive qu'éprouvent un muscle ou un système de muscles à la suite d'un refroidissement, par exemple : douleur qui augmente par le toucher et par le moindre mouvement, ce qui rend ces derniers impossibles. Il arrive ordinairement que, lorsqu'à l'aide de divers agents

[1] M. Duchenne entend par gymnastique nerveuse l'exercice répété de la contractilité volontaire, autant que cela est possible au malade, qui doit s'aider pour cela de tous les moyens nécessaires.

thérapeutiques on s'est rendu maître de la douleur, le mouvement volontaire reprend dans les muscles qui l'avaient perdu; mais quelquefois il ne reparaît pas; c'est à cette abolition momentanée ou permanente de la contraction musculaire qu'on a donné le nom de paralysie rhumatismale; elle peut affecter tous les muscles du corps. M. Duchenne a trouvé que les muscles ainsi paralysés conservent leur contractilité électrique, lors même qu'ils ont perdu le mouvement volontaire; c'est en employant également l'électrisation cutanée et l'électrisation musculaire, et en agissant successivement sur chacun des muscles paralysés en particulier, qu'on réussit assez généralement à obtenir une guérison. Les cas, que M. Duchenne a été appelé à traiter, sont les paralysies rhumatismales de l'avant-bras.

Parmi les paralysies rhumatismales, l'hémiplégie faciale et la contracture qui en est quelquefois la conséquence, est une de celles que M. Duchenne a le plus étudiées. Nous avons déjà vu que cette affection tient à la paralysie de la septième paire, dont les divers degrés peuvent être appréciés assez exactement par l'affaiblissement plus ou moins prononcé de la contractilité électro-musculaire. Dans les cas où cet affaiblissement est à peu près nul, la guérison est très-prompte, et quoiqu'elle ait lieu quelquefois spontanément, il vaut mieux cependant, pour l'obtenir plus sûrement et plus rapidement, l'amener par l'électrisation localisée. Quand la paralysie rhumatismale de la face est telle que les muscles paralysés ne se contractent plus, ce qui constitue son deuxième degré, le cas précédent étant le premier, elle oppose en général une grande résistance aux agents thérapeutiques; cependant elle cède à l'électrisation localisée, ainsi que M. Duchenne l'a souvent constaté; seulement il faut en général de trois à six mois de traitement, et on ne peut pas toujours ramener complétement la contractilité volontaire à l'état normal. Malheureusement la contracture des muscles de la face est une terminaison assez fréquente de cette paralysie, et il est important de la diagnostiquer à temps, ce qui n'est pas toujours facile; car son apparition peut contre-indiquer l'emploi de l'électrisation localisée, ou exiger qu'on en modifie le mode d'application. Un des signes d'une contracture

prochaine est d'abord l'apparition d'un spasme dans un muscle paralysé de la face sous l'influence d'une excitation artificielle ; c'est également, en l'absence de ce spasme, le retour trop rapide et avant le temps, de la tonicité dans un muscle complétement paralysé; c'est également certains changements dans l'expression habituelle de la physionomie, qu'une expérience un peu longue de ce genre d'affections apprend à discerner. En conséquence dans le traitement de la paralysie rhumatismale de la septième paire, M. Duchenne est disposé à croire qu'il vaut mieux, quand cette paralysie est à son deuxième degré, c'est-à-dire que les muscles ont perdu complétement leur contractilité électrique, ne pas appliquer immédiatement l'électrisation localisée, comme on peut le faire avec avantage quand la paralysie n'est qu'à son premier degré; toutefois il a encore quelques doutes à cet égard, et estime que son assertion ne doit pas être considérée comme générale. Quant au mode d'application de l'électricité, M. Duchenne préfère localiser l'excitation dans chacun des muscles paralysés, plutôt que d'agir indirectement sur eux en électrisant le nerf de la septième paire ; ce qui au reste est d'accord avec l'observation générale que les paralysies de mouvement sont plus heureusement influencées par l'excitation directe de la fibre musculaire que par l'intermédiaire de l'excitation du nerf qui l'anime [1]. Pour rappeler la tonicité musculaire et la contractilité volontaire, ce qui est le but dans l'hémiplégie rhumatismale de la face, il faut agir avec des courants à intermittences rapides ; mais quand le retour de la tonicicité musculaire qui précède ordinairement l'apparition des mouvements volontaires a eu lieu, il faut éloigner les intermittences de manière qu'il n'y en ait plus qu'une à quatre par seconde, surtout quand on voit se manifester dans un muscle paralysé les symptômes précurseurs de la contracture. On peut cependant continuer à appliquer l'électrisation localisée, mais avec prudence et avec des intermittences éloignées, à des muscles menacés de contracture et même déjà contracturés.

[1] Nous verrons que c'est l'inverse pour les paralysies et sentiment.

Dans ce dernier cas, il faut joindre au traitement électrique l'élongation directe du muscle, soit en faisant exercer par les malades eux-mêmes des tractions sur les lèvres, les joues, les paupières dans le sens des fibres, soit en leur faisant placer entre la joue et les mâchoires une bille aussi grosse que possible, de manière à distendre fortement la joue, et par conséquent les muscles contracturés.

Il y a encore quelques variétés de paralysie outre celles dont nous avons parlé qui, quoique moins fréquentes, mériteraient cependant d'attirer notre attention, si nous n'étions pas obligés de nous restreindre. Nous mentionnerons en particulier la paralysie générale des aliénés, qu'on risque quelquefois de confondre, soit avec un ramollissement chronique du cerveau, soit avec une maladie de la moelle; l'action des courants électriques peut être employée, non comme moyen thérapeutique, car il ne paraît pas qu'elle puisse être efficace, mais comme moyen de diagnostic, car s'il s'agit d'un ramollissement chronique de la partie supérieure de la moelle épinière, la contractilité électro-musculaire est abolie, ou du moins notablement diminuée. Nous mentionnerons encore la paralysie connue sous le nom de *crampe des écrivains*, qui consiste dans une paralysie incomplète des doigts des personnes qui passent une partie de leur vie à écrire, d'où il résulte pour eux l'impossibilité de continuer l'exercice de leur profession. Quand cette paralysie est toute locale, elle se guérit très-bien par l'application des courants électriques. M. A. Becquerel cite le cas d'un homme dont cinq doigts de la main droite avaient été peu à peu paralysés, et qui au bout d'un mois fut entièrement guéri par un traitement électrique, opéré avec la machine magnéto-électrique de MM. Breton. Mais la paralysie dont il s'agit n'est pas toujours locale; elle a quelquefois son origine dans une affection du centre nerveux; dans ce cas l'électricité, loin d'exercer une bonne influence, est plutôt nuisible.

Les paralysies du mouvement dans les muscles de la vie organique ont été, de la part de M. Duchenne, l'objet d'un grand nombre de tentatives de guérison par l'électricité; ce sont en particulier celles des intestins, du rectum et de la vessie, pour

lesquelles ces essais ont été tentés tantôt avec succès, tantôt sans résultats favorables; il arrive très-souvent que dans le dernier cas c'est la paralysie des muscles de l'abdomen qui est la cause réelle de la maladie; aussi l'électrisation locale portée sur ces muscles est-elle le traitement le plus convenable. Lorsqu'il s'agit de faire parvenir les courants électriques dans des points déterminés de l'intérieur d'un viscère, M. Duchenne emploie pour conducteurs des sondes métalliques, isolées par une enveloppe de caoutchouc, sauf à leur extrémité où le métal est à nu, ce qui fait que les courants ne passent que par les points en contact avec cette extrémité. L'aphonie produite par la paralysie des muscles du larynx a été également guérie dans quelques cas par l'application de l'électricité localisée, pourvu que cette aphonie fût indépendante de toute lésion organique, et non symptomatique d'une autre maladie. Quand l'électrisation musculaire appliquée à la partie antérieure du cou ne suffit pas, il faut y joindre l'électrisation cutanée pratiquée pendant quatre à cinq secondes au niveau du larynx; et en général on en obtient de bons effets. Toutefois dans tous les cas qui précèdent, le plus souvent les paralysies locales ne sont que les symptômes d'autres maladies beaucoup plus graves, et alors l'électricité est malheureusement presque toujours impuissante.

On peut rapprocher des paralysies des muscles de la vie organique celle du diaphragme, dont M. Duchenne a fait une étude toute particulière; cette maladie, qui paraît être extrêmement rare, consiste dans une altération des mouvements réguliers de la poitrine et de l'abdomen pendant l'inspiration et l'expiration, qui amène une inspiration courte et insuffisante aux besoins de la voix; ce n'est pas une maladie mortelle par elle-même, parce que la respiration n'est pas complétement empêchée; mais la plus simple bronchite peut occasionner la mort par asphyxie, l'expectoration étant difficile et même impossible. Le traitement indiqué par M. Duchenne est l'électrisation du diaphragme par l'intermédiaire des nerfs phréniques, ce qui produit une véritable respiration artificielle, qu'on peut obtenir aussi au moyen de l'électrisation cutanée effectuée rapidement sur différentes parties du

corps. Ces deux manières d'obtenir une respiration artificielle peuvent être utilisées également dans les cas où les muscles respirateurs sont à demi paralysés, comme dans certains cas d'empoisonnement, de fièvres graves, etc.

Les paralysies du sentiment ont été, comme celles du mouvement, traitées par l'électricité, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer dans les deux premiers paragraphes de ce chapitre. M. le professeur Wartmann avait déjà, il y a longtemps, indiqué l'emploi des courants d'induction comme propres à réveiller la sensibilité dans les cas d'anesthésie produite par l'inspiration de l'éther, quand cette anesthésie, poussée trop loin, risquerait d'être mortelle[1]; mais nous avons à nous occuper ici des paralysies du sentiment qui proviennent d'un état maladif et qui consistent essentiellement dans un trouble de la sensibilité, soit simplement cutanée, soit aussi musculaire. Ce trouble n'est pas seulement une anesthésie, c'est-à-dire une privation de la sensibilité, mais il est aussi quelquefois une hyperesthésie, c'est-à-dire au contraire une exagération de la sensibilité. Dans ce dernier cas, si l'état pathologique ne provient pas d'une affection des centres nerveux, on peut employer l'électrisation cutanée, en pratiquant sur la peau sèche une fustigation électrique énergique, ou en promenant les conducteurs métalliques pleins sur la région douloureuse, en même temps que l'appareil marche avec des intermittences très-rapides; l'intensité du courant est proportionnée au degré d'énergie et d'excitabilité du malade; l'opération doit durer de deux à cinq minutes. Ce mode de traitement ne produit malheureusement souvent qu'un soulagement momentané; mais il y a cependant des cas de guérison complète. L'électrisation cutanée triomphe plus facilement de l'anesthésie;

[1] L'effet de l'éther, du chloroforme et autres agents anesthésiques, tient probablement à ce que le sang, en apportant aux nerfs les particules très-divisées de ces liquides volatils, détermine en eux une espèce d'inertie, qui leur ôte la susceptibilité de se polariser, comme ils doivent l'être, quand ils transmettent soit les impressions du cerveau à la périphérie, soit les sensations de la périphérie au centre. Il serait intéressant que les physiologistes essayassent l'action directe sur les nerfs des agents anesthétiques; j'ignore du reste si ces essais n'ont point été faits.

l'emploi de la main électrique est suffisant pour la guérison des anesthésies cutanées de la face, mais pour le cou, le tronc et les membres, il faut les excitateurs métalliques pleins, et même si la peau a perdu complétement sa sensibilité, l'emploi des fils métalliques dont l'action est plus profonde, est nécessaire. On place ces fils métalliques sur la partie de la peau frappée d'anesthésie, en faisant marcher l'appareil avec son maximum de force et à intermittences rapides; si l'action thérapeutique est immédiate, comme c'est le cas ordinaire, le malade éprouve dans les points excités un chatouillement accompagné de rougeur et suivi d'une légère sensation de brûlure qui va en croissant rapidement, et qui devient bientôt intolérable. On recommence la même opération sur les parties voisines jusqu'à ce qu'on ait ainsi modifié la paralysie de la peau dans une certaine étendue. Alors on remplace les fils métalliques, devenus insupportables pour le malade, par des excitateurs métalliques pleins, ayant soin de diminuer l'intensité du courant au fur et à mesure que la sensibilité reparaît. En général l'action de l'électrisation cutanée est presque toujours limitée aux points de la peau qui sont mis en contact avec les excitateurs; il arrive quelquefois, mais très-rarement, que la sensibilité revient dans toute l'étendue de la surface de la peau, lors même qu'on s'est borné à exciter plus ou moins vivement un seul point de cette surface. Quoiqu'il y ait assez souvent des rechutes, cependant l'anesthésie cutanée est d'autant plus sûrement guérie que l'excitation électrique a été renouvelée un plus grand nombre de fois. C'est surtout lorsqu'elle siége aux mains et aux pieds, que l'anesthésie cutanée est grave par ses conséquences; mais l'électrisation cutanée et celle des nerfs collatéraux en vient généralement à bout. Cependant il y a aussi bien souvent des insuccès dans la guérison par voie électrique des cas d'anesthésie; il est possible que cela tienne à ce que dans ces cas elles ne sont que des symptômes d'autres maladies. Il est probable que les hyperesthésies et anesthésies cutanées proprement dites et curables proviennent d'un état maladif des houppes nerveuses, et on conçoit l'action de l'électricité qui tend à rétablir ces houppes dans leur état normal, en étant

directement appliquée sur les points de la peau auxquels aboutissent les extrémités de ces filaments de nerfs.

L'hyperesthésie et l'anesthésie musculaires ne sont pas moins fréquentes que celles de la peau. Les muscles, comme tous les organes qui reçoivent des filets nerveux sensitifs ou mixtes émanés du centre céphalo-rachidien, jouissent d'une sensibilité qu'ils tiennent de ces filets nerveux et de leur communication avec l'encéphale. Cette sensibilité, quoique moins vive que celle de la peau, est susceptible cependant comme elle, d'augmentation et de diminution, et même d'abolition. L'électrisation cutanée appliquée à la place douloureuse provoque une vive douleur perturbatrice qui ne tarde pas à modifier ou à dissiper l'hyperesthésie musculaire ; cependant elle présente plus de résistance à ce mode de traitement que l'hyperesthésie cutanée ; il s'agit ici de l'hyperesthésie musculaire hystérique ; quant à celle qui constitue le rhumatisme musculaire, tel que lumbago, douleur musculaire de l'épaule et du cou, elle disparaît rapidement sous l'action de l'électrisation cutanée ; une ou deux fustigations électriques suffisent le plus souvent. La guérison rapide obtenue dans la période d'acuité par de simples excitations électro-cutanées, prouve bien que le rhumatisme musculaire n'est pas inflammatoire, mais qu'il est dû à une névralgie qui a son siége dans les muscles. Quand le rhumatisme musculaire est compliqué de paralysie, ce qui arrive quelquefois, il faut commencer, avant d'appliquer l'électrisation musculaire, par appliquer l'électrisation cutanée pour faire disparaître, autant que possible, la douleur ; c'est surtout dans les muscles du bras et de l'épaule que cette complication survient. Si la contracture accompagne le rhumastisme musculaire, l'excitation électro-cutanée peut la faire disparaître en même temps que la douleur ; M. Duchenne estime qu'on peut l'appliquer dans les torticolis par cause rhumatismale, même pendant la période d'acuité. Lorsque la contracture d'un muscle est arrivée à une période moyenne entre l'état aigu et l'état chronique, que par conséquent le muscle n'est pas encore rétracté, on peut espérer d'en obtenir la guérison en plaçant les muscles antagonistes dans un état de contracture

artificielle, au moyen de l'électrisation localisée pratiquée avec des intermittences rapides; ce traitement réussit surtout dans le torticolis du cou et de l'épaule. Les muscles dont on augmente ainsi artificiellement la puissance tonique, agissent comme des appareils orthopédiques qu'on placerait à l'un des membres inférieurs pour s'opposer à une déformation occasionnée par une contracture musculaire. M. Duchenne conclut d'un assez grand nombre d'observations, que le torticolis produit par la contracture rhumatismale du rhomboïde et des muscles rotateurs de la tête, peut être combattu avantageusement par l'électrisation à intermittences rapides des muscles antagonistes de ceux qui sont contracturés.

Si au lieu d'être augmentée, la sensibilité musculaire est diminuée ou abolie, il faut, comme dans le cas de l'anesthésie cutanée, commencer par traiter la paralysie du mouvement avec laquelle coexistent le plus souvent les deux genres d'anesthésie, qui disparaissent également ordinairement avec cette paralysie. Mais, dans les cas d'hystérie, les deux anesthésies peuvent ou marcher ensemble ou s'isoler; cependant l'anesthésie musculaire profonde est rarement seule, elle accompagne le plus souvent soit la paralysie musculaire, soit l'anesthésie cutanée; on la traite donc en même temps et de la même manière que les deux autres. Lorsque par hasard elle est seule ou qu'elle existe avec la paralysie musculaire, il faut agir avec des courants électriques énergiques et les faire pénétrer par la méthode ordinaire dans l'épaisseur même des muscles. C'est à une espèce d'anesthésie musculaire que tient l'abolition de cette sensibilité spéciale à laquelle, comme nous l'avons déjà dit, M. Duchenne a donné le nom de *conscience musculaire;* les individus chez lesquels manque cette faculté n'ont plus la conscience de l'étendue de leurs mouvements, de la pesanteur, de la résistance, etc.; il leur arrive même quelquefois de perdre, quand on leur enlève momentanément l'exercice de la vue, la faculté d'exercer les moindres mouvements volontaires. M. Duchenne applique dans ce cas l'électricité localisée qui rétablit la conscience musculaire en même temps qu'elle fait disparaître l'anesthésie dans les muscles qui en sont atteints.

Les névralgies, dont nous venons de dire un mot à l'occasion du rhumatisme musculaire qui en est très-probablement une forme, méritent d'autant plus d'attirer un instant notre attention que c'est une des catégories d'affections morbides à la guérison desquelles on a depuis longtemps appliqué l'électricité. Rien n'est si peu connu que la cause des névralgies; bien souvent elles peuvent être occasionnées par quelque petite tumeur, quelque désordre musculaire qui agit sur le nerf et produit la douleur. Mais nous ne parlons ici que de celles qui ont leur siége dans le nerf lui-même. S'il est permis d'énoncer une opinion, peut-être bien hasardée sur ce sujet, nous serions disposé à voir dans les névralgies proprement dites une perturbation dans l'état électrique naturel du nerf, de telle façon qu'il y aurait lutte entre sa disposition anormale et l'action nerveuse régulière. Or rétablir, si c'est possible, l'influence prédominante de cette dernière action serait le moyen le plus sûr de combattre la névralgie; et pour cela, l'emploi de l'électricité semblerait indiqué. La forme sous laquelle l'électrisation devrait avoir lieu ne serait pas indifférente; il faudrait d'abord tâcher de faire pénétrer directement dans les nerfs les courants électriques, ensuite il serait important de donner à ces courants une direction telle, que le nerf fût dans un état électrique semblable à celui qu'il a dans l'état normal. Or, la pratique médicale indique la nécessité d'avoir égard aux deux points que nous venons de signaler. M. Magendie a eu, le premier, l'idée de faire arriver les courants jusqu'aux nerfs, dans le traitement des névralgies de la cinquième paire, en introduisant deux aiguilles de platine, l'une à l'origine du nerf, ou au moins dans son voisinage immédiat, l'autre vers sa terminaison. Le courant continu d'une pile d'abord peu forte, mais dont on pouvait graduellement augmenter un peu la puissance, passait d'une aiguille à l'autre en parcourant le nerf et toutes ses divisions; après la cessation de la douleur, qui n'avait lieu ordinairement qu'après plusieurs séances successives, on ne retirait pas immédiatement les aiguilles, mais on faisait exécuter au malade quelques-uns des mouvements qui ramènent ordinairement la névralgie, afin d'être bien certain qu'elle eût disparu. Quoique M. Magendie

ait aussi employé les courants d'induction, M. James, qui a écrit un ouvrage sur le *Traitement des névralgies par l'électricité*, remarque que pour réussir on est obligé souvent de faire usage d'un véritable courant continu. M. A. Becquerel caractérise, sous le nom de méthode substitutive ou perturbatrice, ce mode d'application des courants électriques. Lui-même a obtenu des résultats très-satisfaisants par une méthode qu'il appelle hyposthénisante, et qui me semble avoir beaucoup de rapports avec la précédente. Elle consiste aussi à faire circuler un courant direct et continu d'une certaine intensité dans le nerf; mais il est indispensable que le pôle positif de la pile qui produit ce courant soit placé vers le centre nerveux et le pôle négatif à la périphérie, de façon que le courant soit direct, c'est-à-dire qu'il parcoure les nerfs dans le sens de leur ramification. Si le courant est indirect, l'action thérapeutique n'en aurait pas moins lieu, mais les douleurs seraient beaucoup plus vives pendant tout le temps qu'on ferait circuler le courant dans les nerfs. M. Becquerel, s'appuyant sur les expériences de MM. Nobili et Marianini que nous avons citées dans la quatrième partie de ce Traité [1], croit qu'en agissant ainsi sur le nerf, on engourdit momentanément sa sensibilité comme sa motilité, et c'est ce qui lui a fait donner à sa méthode le nom d'*hyposthénisante*. Quoique, pour faire pénétrer le courant dans le nerf, la méthode de l'électro-puncture de Magendie soit certainement plus sûre, cependant M. A. Becquerel, pour éviter une douleur trop vive aux malades, se contente le plus souvent de deux éponges humides pour électrodes; on applique l'une, la positive, sur le point du nerf le plus rapproché du centre nerveux; on promène l'autre, la négative, successivement sur les branches du nerf qui sont douloureuses. Ce traitement en général n'est pas long; si au bout de douze ou quinze séances on n'a rien obtenu, il est bien probable qu'on ne réussira pas. M. A. Becquerel a remplacé sans inconvénient, dans ce genre de médication, la pile à auges par un appareil d'induction, mais en ayant soin de n'avoir qu'un des courants induits tou-

[1] Tome II, page 439.

jours dirigé dans le même sens, et en disposant les électrodes de façon que ce sens soit tel que l'électricité positive arrive du côté des centres nerveux, et la négative par la périphérie. Il faut de plus que les intermittences soient très-rapides ; dans ces conditions, les courants induits agissent comme des courants continus. Seulement dans le premier instant la douleur est très-vive, et elle est accompagnée d'un tremblement fibrillaire des muscles placés sur la route des courants ; cette douleur est bientôt remplacée par la sensation d'un engourdissement qui augmente peu à peu, finit par devenir complet et profond, et persiste jusqu'à la fin de l'application. M. A. Becquerel cite plusieurs cas intéressants de guérison qu'il a obtenus par la méthode que nous venons de décrire, entre autres celui d'une jeune personne, âgée de dix-neuf ans, atteinte d'une névralgie qui occupait les deux nerfs sus-orbitaires, et qui avait une marche régulière. Commençant à onze heures du matin, elle était tolérable jusqu'à quatre ou cinq heures après midi, moment à partir duquel elle augmentait d'intensité jusqu'à deux heures du matin, à un point tel que la malade ne pouvait s'empêcher de pousser des cris perçants, et qu'il y avait, dans les instants où la douleur était la plus vive, des mouvements convulsifs du front et des paupières. A deux heures du matin la douleur décroissait progressivement jusqu'à cinq heures du matin, heure à laquelle le sommeil survenait ; puis tout recommençait à onze heures. Tous les remèdes avaient été essayés, mais en vain : sulfate de quinine, opium, valériane, vésicatoires morphinés, etc. Le traitement électrique fut alors appliqué ; les trois premiers jours une séance de dix à quinze minutes fut donnée à une heure, les deux électrodes étant placés entre les deux régions temporales pendant une moitié de la séance, et entre les deux nerfs sus-orbitaires pendant la seconde moitié. Chaque fois la douleur disparut subitement, et la malade n'en ressentit aucune atteinte jusqu'à six heures du soir, instant auquel elle revenait. Dès lors on fit deux séances par jour, une à une heure, l'autre à six heures, et en dix jours la guérison fut complète et absolue.

Outre la méthode que nous venons de décrire, on en emploie,

dans le traitement des névralgies, une autre imaginée par M. Duchenne qui est la méthode révulsive, fondée sur l'électrisation cutanée. Nous en avons déjà parlé plus haut à l'occasion des hypéresthésies en donnant des détails suffisants sur la manière dont on la pratique; suivant M. Becquerel, ce mode d'application de l'électricité produit l'anesthésie du nerf malade en déterminant une douleur dérivatrice; nous sommes plutôt disposé à croire que c'est, comme nous l'avons dit, par un effet direct sur les dernières ramifications nerveuses qu'il agit. Ce mode de traitement, appliqué particulièrement par M. Duchenne à la névralgie sciatique, est susceptible cependant d'être employé contre toute autre espèce de névralgie. Quoiqu'il ne donne pas toujours des résultats satisfaisants, il est néanmoins des cas particuliers où il semble plus approprié que le premier, dont l'emploi nous paraît pourtant plus rationnel et plus propre à amener une guérison prompte et complète.

Parmi les paralysies du sentiment, celles des organes des sens méritent tout particulièrement d'attirer notre attention, quoique jusqu'ici, il faut le reconnaître, l'emploi de l'électricité dans leur traitement n'ait pas donné des résultats bien satisfaisants.

Magendie est le premier qui ait essayé, par une application rationnelle de l'électricité, de traiter la paralysie complète ou incomplète de la vue, c'est-à-dire l'amaurose à ses différents degrés; il paraît bien qu'il a obtenu quelques succès; cependant ce mode de traitement n'a pas été généralement adopté, ce qui prouve qu'il laisse quelque chose à désirer, et qu'il n'est pas peut-être sans inconvénient. Remarquons d'abord qu'il serait parfaitement inutile d'employer l'électricité pour le traitement des amauroses qui sont liées à un état général, ou qui proviennent d'une maladie du cerveau; il n'y a que les amauroses essentielles proprement dites, qu'on ait quelques chances de guérir par ce moyen. Parmi celles-ci, les hystériques, n'étant le plus souvent que passagères, disparaissent en général d'elles-mêmes ou cèdent à une médication ordinaire, telle que l'hydrothérapie; cependant si elles sont persistantes, l'emploi de l'électricité peut avoir un bon effet. Les

amauroses, qui sont accompagnées de congestion vers la tête, ne doivent pas être traitées par l'électricité, traitement qu'il faut surtout garder pour celles qui marchent avec un état de faiblesse de l'organisme. Il est rare, même dans ce cas, que lorsque la vue est perdue d'une manière absolue, on obtienne une guérison; cependant Magendie a guéri un cas d'amaurose complète. Plus on emploie l'électricité à une époque rapprochée du début de la maladie, plus on a de chances de réussir. C'est évidemment à une paralysie du nerf optique que sont dues les amauroses qui nous occupent. Aussi plus on atteindra ce nerf directement par l'électricité, plus on opérera dans de bonnes conditions; sous ce rapport l'électro-puncture, si elle n'effrayait pas trop les malades, serait le meilleur mode d'application; c'est ainsi qu'opérait Magendie. M. Person également, en implantant les aiguilles dans l'orbite et même dans la sclérotique jusqu'à l'humeur vitrée, a obtenu plusieurs cas de guérison complète; M. Magendie et lui se servaient de courants continus. Ce sont aussi ces courants qu'emploie M. Purkinje, qui a remarqué que le sens du courant est loin d'être indifférent; ainsi, lorsque l'amaurose est à son début et qu'elle est accompagnée de douleurs subjectives, c'est l'électrode négatif qu'il place le plus près possible de l'œil sur lequel il veut agir, tandis que c'est l'électrode positif qu'il place ainsi quand l'amaurose débute par un affaiblissement de sensibilité de la rétine; le pôle contraire à celui qui est près de l'œil, étant placé à une certaine distance, en contact avec la muqueuse buccale, par exemple.

M. Duchenne cite un cas de diplopie qu'il a réussi à guérir par le courant d'une pile assez forte, en appliquant les deux électrodes humides respectivement sur les deux paupières du malade préalablement fermées. Deux excitations successives furent données à une seconde d'intervalle et à une dose très-forte. Le malade vit une flamme considérable qui lui causa une sorte d'éblouissement; il secoua la tête et ouvrant les yeux, il dit : Vous n'avez plus qu'une tête; je ne vois plus double. Sa guérison a été complète et s'est maintenue. M. Duchenne n'avait pas été toujours aussi heureux; ayant traité un jour des muscles paralysés de la face avec le courant d'une pile, il

occasionna dans l'œil du malade l'apparition d'une flamme subite (phosphène), qui fut suivie d'un trouble considérable de la vue dans cet œil, trouble qu'on n'a pas réussi à faire disparaître. C'est cet accident qui, en démontrant à M. Duchenne l'action spéciale des courants continus sur la rétine, l'engagea à faire l'essai que nous avons cité le premier, et dont le résultat fut des plus satisfaisants. Nous avons déjà remarqué que M. Duchenne a reconnu aux courants d'induction qu'il appelle du deuxième ordre, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas les extra-courants, la même propriété d'agir sur la rétine. Cependant M. A. Becquerel conseille de se servir plutôt des courants de tension médiocre et administrés avec des intermittences lentes, en appliquant les électrodes humides autour des orbites, sur les paupières mêmes; les séances doivent être courtes; il en faut un très-grand nombre, et on doit agir en général avec beaucoup de précautions et de patience; le traitement peut durer quelquefois plusieurs mois. Si les éponges humides ne suffisent pas, on peut essayer l'électro-puncture qui présente de bonnes chances de succès.

La paralysie de l'organe de l'ouïe a été traitée aussi par l'électricité; mais il est évident qu'ici, comme pour l'organe de la vue, ce mode de traitement ne peut présenter de chances de succès qu'autant que le siége du mal est dans le système nerveux auditif. C'est pourquoi on ne doit l'appliquer qu'après un diagnostic fait avec beaucoup de soin. Toutefois, même après qu'on s'est assuré par une exploration rigoureuse que l'oreille moyenne est saine, que tous les passages sont libres, et que par conséquent la surdité a son siége dans l'oreille interne, il ne s'ensuit pas, comme le remarque judicieusement M. Ménière [1], qu'elle provienne d'une lésion même du nerf acoustique. Il y a tant d'autres parties, tant de tissus dans l'oreille interne dont la lésion peut être une cause de surdité, que la conclusion que nous venons d'indiquer pourrait bien être souvent hasardée.

[1] Nous renvoyons pour les détails à un morceau très-intéressant de M. Ménière, l'habile médecin en chef de l'Institut des sourds-muets, inséré dans le *Traité des applications de l'électricité à la thérapeutique* de M. A. Becquerel.

Mais la surdité fût-elle nerveuse, M. Ménière, à la suite d'un grand nombre d'essais variés de beaucoup de manières, estime que les courants d'induction n'ont pas d'efficacité dans le traitement de cette surdité, si elle est essentielle et non pas symptomatique, comme celle qui s'observe chez les hystériques, cas dans lequel presque tous les moyens thérapeutiques ont un égal succès.

Malgré ces résultats décourageants, appuyés d'une autorite trop respectable pour ne pas y ajouter une pleine confiance, nous voyons qu'il y a des cas rebelles aux autres moyens curatifs dans lesquels on peut essayer l'emploi de l'électricité, qui d'ailleurs ne présente pas d'inconvénients, s'il n'offre pas les avantages qu'on en attend. Aussi nous donnerons en quelques mots les moyens d'opérer indiqués par M. Duchenne. On commence par injecter dans le conduit auditif externe, qui est placé verticalement au moyen de l'inclinaison de la tête, une quantité d'eau suffisante pour remplir sa première moitié. On y plonge un fil métallique, qu'on met en communication avec l'un des électrodes des courants induits, pendant que l'autre se termine par une éponge humide enfoncée dans un cylindre que l'on place sur la nuque; il faut avoir soin que le fil métallique ne soit point en contact avec la membrane du tympan ou avec les parois du conduit auditif. On ne doit employer que des courants très-faibles et appropriés à la délicatesse de l'organe sur lequel on agit. Les sensations qu'éprouve l'oreille, lorsqu'elle est saine, sont assez remarquables; c'est d'abord un bruit sec, qui se rapproche de celui du battement des ailes d'une mouche qui vole entre une vitre et un rideau lorsque les intermittences deviennent très-rapides. Puis à ces phénomènes d'audition s'ajoute une sensation de chatouillement qui se communique à différentes parties de la langue; il y a également une sensation gustative spéciale qui se manifeste quand l'excitation est assez énergique. Les sensations perçues dans le fond de l'oreille et dans les deux tiers antérieurs de la langue annoncent bien une excitation des nerfs de la membrane et de la corde du tympan, ce qui semble devoir faire espérer qu'une opération qui ébranle si profondément le système nerveux de l'oreille, doit exercer une influence heureuse sur certaines sur-

dités nerveuses. M. Duchenne cite en effet, à côté d'un nombre à peu près égal d'insuccès, des cas où il a obtenu par l'électrisation de la membrane et de la corde du tympan, soit la guérison, soit une amélioration dans des surdités nerveuses indépendantes d'une lésion organique. Tout dernièrement il a réussi à guérir presque entièrement un enfant affecté d'une surdi-mutité congéniale, de l'espèce de celles qui jusqu'ici ont été considérées comme incurables. Ce cas, qui est le premier de ce genre, est d'un immense intérêt; s'il n'est pas l'effet d'une illusion, si en particulier il se répétait, il démontrerait que la surdi-mutité congéniale peut, sous l'influence de l'excitation électrique de l'oreille interne, être, sinon complétement guérie, du moins considérablement améliorée; c'est en opérant sur l'oreille interne, suivant le mode que nous avons décrit plus haut, que M. Duchenne a obtenu ce résultat inattendu.

Quant à l'odorat et au goût, les tentatives qui ont été faites pour les rendre par un traitement électrique, quand ils ont été perdus, sont trop peu nombreuses et trop peu importantes pour que nous nous y arrêtions.

Parmi les maladies au traitement desquelles on a appliqué avec succès l'électricité, nous devons mentionner encore les atrophies; nous avons déjà parlé de celles qui atteignent les muscles qui, par l'effet d'une paralysie ou par une cause quelconque, cessent de fonctionner; nous n'y reviendrons pas. Mais il en est d'autres auxquelles on ne peut alléguer de causes générales, et dans lesquelles les différentes parties du système nerveux, l'encéphale, la moelle épinière et les nerfs, restent dans un état d'intégrité parfaite, avec cette différence cependant que dans plusieurs d'entre elles les racines antérieures des nerfs spinaux sont atrophiés; ce sont les racines postérieures de ces mêmes nerfs qui seules restent intactes. Cette espèce d'atrophie, désignée sous le nom d'atrophie musculaire graisseuse progressive, envahit successivement faisceau par faisceau, fibre par fibre, les muscles soumis à la volonté, en laissant intactes la sensibilité générale et spéciale, les facultés intellectuelles et affectives, et toutes les fonctions de la vie de nutrition autres que la nutrition des muscles. M. Cruveilher, à qui l'on

doit la découverte de l'existence, dans cette affection, de l'atrophie des racines antérieures des nerfs spinaux comme accompagnant celle des muscles, reconnaît deux degrés dans cette dernière : dans le premier, le muscle est réduit du cinquième au dixième et même au vingtième de son poids, sans altération de structure, mais seulement avec une diminution notable dans l'intensité de la coloration rouge; le deuxième degré est alors l'atrophie par transformation graisseuse. Suivant M. Duchenne et M. Valérius, la sensibilité et la contractilité électriques sont diminuées, mais non abolies dans un muscle atteint d'atrophie; plus tard, et même avant que les fibres musculaires se soient toutes atrophiées, le muscle ne se contracte plus, quelque intenses que soient les courants auxquels on le soumet, mais la sensibilité des nerfs sensoriaux qui n'avait été que peu ou point affaiblie persiste toujours. M. A. Becquerel croit que la contractilité électrique persiste dans les fibres restantes, et qu'elle y conserve le même degré d'énergie, mais que, comme ces fibres ont considérablement diminué en nombre, la contractilité totale du muscle est notablement diminuée. Lorsque les muscles sont le siége de la transformation graisseuse, la contractilité électro-musculaire est alors tout à fait anéantie. M. A. Becquerel ne croit pas que, dans ce genre d'affections, l'électricité puisse être appliquée avec avantage; c'est aussi l'opinion de M. Valérius. M. Duchenne estime au contraire que, tant que les muscles conservent leur contractilité électrique et les contractions fibrillaires, avant la période extrême où la transformation graisseuse commence à se produire, il est permis d'espérer de les sauver d'une destruction complète, et peut-être de les développer plus ou moins en y rappelant la nutrition au moyen de l'électrisation localisée. Il me semble que les cas remarquables de guérison ou d'amélioration cités par M. Duchenne prouveraient la vérité de son assertion, du moins quand l'atrophie musculaire graisseuse est locale et est la conséquence d'un travail forcé et continu; mais il est probable qu'il n'en serait plus de même quand l'atrophie est générale et spontanée, sans cause occasionnelle. Il semble résulter en effet des cas de guérison cités par M. Du-

chenne, que l'atrophie musculaire progressive se porte exclusivement sur les muscles qui sont le plus fatigués, et qu'une fois guéris par l'électrisation localisée, le seul fait de la reprise d'un travail pénible occasionne des rechutes.

Une question générale très-intéressante se présente ici; lorsque, comme cela a lieu dans les cas qui nous occupent, l'atrophie des racines antérieures des nerfs spinaux accompagne l'atrophie musculaire graisseuse, il semble difficile de comprendre qu'on puisse guérir, même par l'électricité et en agissant uniquement sur eux, des muscles auxquels n'arrive plus l'influence nerveuse qui leur donne la vie et détermine la nutrition. M. Duchenne est disposé à croire qu'ici, comme dans le cas de l'expérience de M. Cl. Bernard, que nous avons citée plus haut [1], des conducteurs nerveux de nouvelle formation remplacent les racines nerveuses atrophiées, et que l'électricité rend aux muscles la propriété, longtemps suspendue, de subir pour leur nutrition l'influence nerveuse qui avait été arrêtée ou gênée. Ce point de vue, dont nous ne saurions méconnaître la justesse, conduirait à admettre que l'électricité ne saurait être efficace qu'autant que la cause fondamentale du mal, l'atrophie des racines nerveuses, aurait déjà cessé ou du moins diminué; son action consisterait donc essentiellement, comme nous l'avons déjà observé dans nos remarques préliminaires, à rétablir la relation interrompue entre les muscles et les dernières ramifications nerveuses destinées à les animer. La présence de la contractilité volontaire et de la contractilité électrique, qui persistent dans cette affection, tant qu'elle est curable, semblent à M. Duchenne ne pouvoir se concilier avec le nom de paralysie atrophique que M. Cruveilher lui a donné; il est même convaincu qu'en s'y prenant à temps, c'est-à-dire en n'attendant pas pour agir que les muscles ne remplissent plus du tout leurs fonctions, ou qu'ils soient entièrement détruits, on peut non-seulement arrêter la marche envahissante de la maladie, mais même refaire de la fibre au moyen de l'électrisation localisée. Il est probable que les divergences qui existent entre M. Duchenne

[1] Tome III, page 624 (note).

et M. A. Becquerel, relativement au traitement des atrophies musculaires progressives, tiennent ici, comme cela arrive si souvent, simplement à ce que les cas observés par ces deux habiles médecins n'étaient nullement dans les mêmes conditions, soit quant à l'origine, soit quant à la période de la maladie

Le traitement de l'atrophie musculaire graisseuse progressive exige en général l'emploi d'appareils de très-grande force et à intermittences très-rapides ; il est évident qu'il faut diminuer graduellement l'intensité du courant, tout en la maintenant considérable, à mesure que s'accroît la sensibilité des muscles, d'abord obtuse; la durée de chaque application ne doit pas être trop prolongée (huit à dix minutes au plus). Enfin il faut avoir soin de diriger l'excitation électrique, surtout sur les muscles dont les usages sont les plus nécessaires, tels que ceux qui sont les agents indispensables de la respiration et du mouvement.

Nous avons vu que M. Duchenne n'a pas distingué l'atrophie musculaire essentielle, qui est la conséquence de l'atrophie des racines antérieures des nerfs rachidiens, désignée par M. Cruveilher sous le nom de paralysie atrophique, de celle dans laquelle il n'y a aucune lésion des nerfs, et qui nous paraît cependant différer essentiellement de la première; par contre il classe avec raison sous un chef distinct, sous le nom de paralysie atrophique graisseuse de l'enfance, la maladie décrite avec grand soin par M. Rilliet sous le nom de paralysie essentielle de l'enfance. M. Duchenne admet, dans cette paralysie, deux degrés, l'un dans lequel la contractilité électrique musculaire est intacte, l'autre dans lequel elle est au contraire très-affaiblie et même abolie. Comme on le voit, l'exploration électrique musculaire permet de distinguer ces deux degrés, qui semblent correspondre à deux genres d'affections, l'une qui suit une marche aiguë et se termine par une guérison rapide, l'autre ayant une durée plus longue et se terminant par l'atrophie et la transformation graisseuse d'un plus ou moins grand nombre de muscles. La première est peut-être une affection périphérique légère, probablement de nature rhumatismale, tandis que la seconde tient, à ce qu'il paraît, à un état morbide quelconque d'une partie plus ou moins étendue de la moelle épinière, car elle se

rapproche beaucoup par ses symptômes et par sa marche, de la paralysie consécutive à la lésion traumatique des nerfs spinaux ou de la moelle. La paralysie atrophique graisseuse de l'enfance se distingue de la paralysie atrophique progressive que nous avons décrite plus haut, en ce que, contrairement à celle-ci, elle va en décroissant, ce qui tient à la cause très-différente des deux affections. M. Duchenne s'est beaucoup occupé de cette maladie; il a constaté, dans un très-grand nombre de cas, que l'électricité localisée, appliquée à temps, peut abréger la durée de la paralysie, diminuer, sinon prévenir l'atrophie des muscles, et peut-être empêcher leur transformation graisseuse. Il a vu, à une époque très-avancée de la maladie (après un an et plus de durée), les muscles qui ne sont point graisseux recouvrer leur contractilité électrique, quelque atrophiés qu'ils aient été. Lors même que l'absence de toute contractilité électrique ferait craindre que le tissu musculaire soit devenu entièrement graisseux, il faut encore essayer un traitement électrique pour le cas possible où il resterait, comme cela s'est présenté, quelques fibres musculaires saines, cachées dans l'épaisseur du tissu graisseux. L'électricité localisée, en favorisant leur nutrition, finit par les développer en augmentant à la fois leur force et leur étendue.

Obligé de nous restreindre, nous ne nous arrêterons pas longtemps à toutes les affections autres que celles dont nous avons parlé, qu'on a également essayé de traiter par l'électricité; ce serait d'ailleurs malheureusement enregistrer plus d'insuccès que de succès. Nous avons déjà indiqué la méthode de Nobili, appliquée par Matteucci pour la guérison du tétanos; cette méthode, qui consiste à faire passer un courant continu direct le long de la moelle épinière, en introduisant le malade graduellement dans le circuit voltaïque pour éviter les contractions musculaires, n'a jamais été appliquée qu'une fois; le malade parut soulagé, mais les blessures qui avaient occasionné le tétanos étaient trop graves pour qu'il pût survivre, de sorte qu'on ne put pas tirer de conclusion positive. D'ailleurs, comme le remarque M. Dubois-Reymond, la moelle épinière étant située très-profondément, il faudrait, pour agir sur elle, faire usage

de courants très-intenses, ce qui, d'un autre côté, ne serait pas sans danger; de plus il serait nécessaire d'agir aussi directement sur les muscles tétanisés eux-mêmes.

Les convulsions en général ont été également dès longtemps soumises à des traitements électriques; il est évident qu'on n'a rien à espérer de ces traitements pour celles qui sont une conséquence d'une lésion actuelle quelconque de la moelle ou du cerveau; c'est tout au plus les contractures accompagnées ou non de paralysie qui persistent après que les lésions des centres nerveux sont cicatrisées, qu'on peut avoir quelque espérance de guérir par l'application de l'électricité, comme nous en avons cité quelques exemples. Quant aux convulsions des enfants, qui ont lieu en général sous l'influence d'une excitation cérébrale, l'emploi de l'électricité non-seulement n'offrirait pas de chance heureuse, mais pourrait être dangereuse en risquant d'augmenter cette excitation. Il n'en est point de même des convulsions et des contractures hystériques auxquelles l'application judicieuse du traitement électrique peut être fort utile, comme elle l'est du reste, ainsi que nous l'avons vu dans la plupart des affections hystériques en général. Nous ne reviendrons pas sur l'application faite par M. Remack des courants continus à la guérison des contractures, guérison qu'il regarde comme une conséquence d'une action réflexe et d'une excitation spéciale des centres nerveux; ce point mériterait un examen approfondi, pour lequel de nouvelles observations seraient encore nécessaires.

L'épilepsie, la catalepsie ont été, dit-on, guéries par l'électricité; mais ces prétendues guérisons, annoncées déjà dans les premiers temps où l'on essayait l'action thérapeutique de l'électricité, n'ont jamais été vérifiées, et on n'a pas tenté de les renouveler jusqu'à présent. La chorée paraît plus susceptible d'éprouver une influence heureuse de la médication électrique; quelques essais tentés par M. A. Becquerel tendraient à le prouver; malheureusement le nombre des faits relatifs à ce mode de traitement pour ce genre de maladie est très-restreint, et il serait bien à désirer que de nouvelles recherches vinssent fixer les idées sur ce point d'une manière plus positive.

L'asthme et l'angine de poitrine sont encore deux sortes d'affections pour lesquelles un traitement électrique a été tenté. M. Duchenne dit avoir réussi à guérir l'asthme nerveux par l'électrisation cutanée, mais il n'a cité à cet égard aucun cas positif, ne trouvant pas encore ses observations assez nombreuses, et étant dans l'intention de poursuivre ses expériences.

L'angine de poitrine, maladie heureusement assez rare et qui est une affection probablement de nature nerveuse, a été l'objet de recherches fort intéressantes de la part de M. Duchenne. Il paraît bien constaté, d'après ces recherches, qu'elle est indépendante des lésions organiques du cœur, qui du reste sont beaucoup plus fréquentes qu'elle, mais qu'elle accompagne quelquefois. Dans l'opinion de M. Duchenne, c'est l'accès qui, dans l'angine de poitrine, tue presque toujours. Il importe donc de chercher le moyen d'arrêter ces accès, puisque un seul peut être suivi de mort immédiate, et d'empêcher leur retour en enrayant la maladie. C'est en appliquant pendant l'accès sur chaque mamelon du malade l'extrémité de chacun des fils conducteurs de son appareil d'induction à son maximum de force, qu'il a réussi à faire disparaître la douleur de l'angine et les autres phénomènes qui l'accompagnaient; mais la douleur artificielle fut atroce, quoique instantanée. Quelques électrisations cutanées pratiquées à des intervalles assez éloignés sur les points douloureux enlevèrent le reste de l'angine, et le malade put reprendre son état de corroyeur. Ce mode de traitement réussit presque aussi bien dans un second cas cité par M. Duchenne. Néanmoins ici aussi un plus grand nombre d'observations serait nécessaire pour établir sur une base solide le traitement électrique, dans le cas de l'angine de poitrine, quoique nous reconnaissions volontiers que s'il est bien démontré que cette affection n'est qu'une forme de névralgie, ce mode de traitement doive donner des résultats satisfaisants.

Nous terminerions ici cette longue énumération des divers cas pathologiques dans lesquels le traitement électrique a été tenté à différentes époques et sous différentes formes, si un cas intéressant, que nous citerons encore, ne venait nous démontrer combien ce mode de traitement, tout en étant précieux

pour la guérison d'affections locales, est impuissant, comme au reste presque tous les autres, contre le principe morbide, duquel, dans tous les cas, dérivent ces affections quand elles ne sont que les symptômes d'un état maladif général et non un simple mal local. Ce cas, auquel nous venons de faire allusion, et qui a été observé à Genève par MM. les docteurs Coindet et Duval, est relatif à une jeune fille de dix-sept ans et demi, chez laquelle s'est manifestée une gangrène des doigts, dépendant d'un arrêt momentané de circulation sous l'influence hystérique. Tous les doigts de la main droite, à l'exception du pouce, étaient de couleur ardoisée jusqu'au milieu de la deuxième phalange, froids et complétement anesthésiés; l'index et le doigt du milieu étaient contractés dans une demi-flexion; tout mouvement était impossible, et la malade éprouvait de vives douleurs. Le pouls radial était tout à fait insensible, et il fallait remonter jusqu'au milieu du bras pour percevoir les pulsations de l'artère humérale. A gauche les mêmes symptômes existaient à un degré moindre, et on y percevait la pulsation de l'artère radiale. L'électrisation ayant été pratiquée avec l'appareil volta-électrique de M. Duchenne, la jeune fille, au bout de dix minutes, s'écria qu'elle pouvait remuer les doigts, et elle les remua; en même temps la douleur cessa, les pulsations radiales reparurent à droite, et s'élevèrent de 92 à 116 par minute; le sommeil, absent depuis cinq nuits, reparut; cependant au bout de quelques heures la douleur revint. Les jours suivants on continua le même traitement; après chaque séance d'électrisation la douleur cessait pour revenir, il est vrai, mais après un intervalle de plus en plus long. La roideur des doigts était moins ferme; les nuits étaient bonnes; la contracture avait disparu depuis la première séance, et les pulsations du pouls n'ont plus dès lors cessé d'être perceptibles. Dès le deuxième jour, il se manifesta après chaque séance une abondante transpiration des doigts, d'une odeur fétide. Au bout de sept jours la couleur des mains était devenue tout à fait normale, sauf à la face palmaire de la troisième phalange de l'index et de l'annulaire, dont l'épiderme s'était soulevé et finit par tomber dans un bain. Dès lors l'affec-

tion locale ne reparut plus. Le traitement accessoire avait consisté en bains et quelques laxatifs et diurétiques. Mais, malgré cette guérison, la santé générale est restée mauvaise; il y a eu des accidents hystériques, et la jeune fille est devenue phthisique. On voit cependant que l'effet de l'électricité a été extrêmement prompt et d'une évidence incontestable, mais que s'il a pu guérir le mal local, il n'a pu modifier le fâcheux état de la santé générale qui avait probablement amené ce mal.

Nous ne terminerons pas ce long paragraphe sans insister de nouveau sur les précautions qu'exige l'emploi de l'électricité dans la thérapeutique. L'électricité, si elle ne produit pas de bons effets, n'est pas toujours du moins complétement innocente; ainsi les décharges des bouteilles de Leyde, le courant d'une pile trop forte, et surtout les courants des puissants appareils d'induction, peuvent occasionner des accidents cérébraux et nerveux qu'il est important d'éviter. Il est vrai que ces accidents sont variables avec les individus; mais le nombre de ceux qui ne sont pas prédisposés à les éprouver est bien moindre que le nombre de ceux qui en sont affectés. Les accidents que peut produire l'électricité sont très-variés; ce sont d'abord un état général de fatigue, de brisement des membres, une grande susceptibilité nerveuse, quelquefois même une congestion cérébrale; ce sont aussi la réapparition de maladies anciennes, telles que névralgies, divers accidents nerveux, le renouvellement d'hémorragies cérébrales, etc.; c'est encore une augmentation d'intensité des maladies chroniques qui existent au moment où l'on administre l'électricité; l'existence de semblables maladies, lorsqu'elles ont une certaine intensité, doit faire craindre l'emploi de l'électricité, lors même qu'il en résulterait quelque amélioration momentanée.

Indépendamment de ces accidents généraux, l'électricité peut, quand elle est mal appliquée ou appliquée mal à propos, produire des effets locaux fâcheux. C'est ainsi qu'elle risque, quand on s'en sert trop tôt ou qu'on l'emploie trop intense, d'aggraver ou de renouveler les paralysies symptomatiques des maladies du cerveau et de la moelle. Dans les paralysies rhumatismales aiguës, l'emploi de l'électrité augmente sou-

vent les douleurs et les rend intolérables, sans produire aucun bien au fond. Nous n'insisterons pas sur les accidents qui peuvent provenir de ce qu'on agit avec des doses trop fortes d'électricité, en particulier dans le traitement des anesthésies et des paralysies des organes des sens; nous en avons déjà donné des exemples, en nous occupant de ce genre d'affections; d'ailleurs il est évident qu'il en est de ce procédé thérapeutique comme de tous les autres qui, salutaires quand ils sont appliqués à doses modérées, deviennent dangereux quand on les exagère. Dans les névralgies il est rare que le traitement électrique, soit qu'il ait lieu par la méthode révulsive de l'électrisation cutanée, soit qu'on opère en agissant directement sur les nerfs par la méthode hyposthénisante, produise des accidents. Il n'en est pas de même des maladies convulsives pour lesquelles l'emploi de l'électricité exige beaucoup de précautions. Il est des affections, telles en particulier que les atrophies, pour lesquelles il importe excessivement de savoir appliquer l'électricité au moment opportun; car autant elle peut faire de bien quand elle est appliquée à temps, autant elle peut être fâcheuse quand on l'applique trop tard.

Telles sont quelques règles générales que l'expérience a indiquées; mais c'est surtout au tact du médecin, à son diagnostic et à sa prudence, qu'il faut s'en remettre pour la direction à suivre dans l'emploi de cet agent thérapeutique, dont la médecine a déjà tiré parti, mais dont elle a encore, suivant nous, beaucoup à espérer[1].

§ 4. Effets thérapeutiques indirects de l'électricité.

Nous avons déjà dit que nous classions sous ce chef les effets thérapeutiques que produit l'électricité, quand elle agit non plus en vertu de ses propriétés physiologiques, mais en vertu de ses propriétés chimiques ou physiques, et par conséquent comme tout autre agent chimique ou physique. Nous

[1] Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans rappeler que c'est à M. Masson qu'on doit, à la suite d'expériences électro-physiologiques très-intéressantes, la première idée de l'application des courants induits à la thérapeutique.

parlerons aussi ici des effets qui tiennent à l'action de l'électricité en général, sans qu'on puisse assigner exactement à quel genre de propriété ils se rapportent, tel est par exemple celui qui consiste à rappeler la sécrétion lactée. En effet, quoique la sécrétion lactée soit une véritable opération chimique, il est bien probable que l'électricité, en la provoquant, n'agit pas chimiquement, mais bien physiologiquement, en excitant les nerfs qui se rendant aux glandes mammaires déterminent la sécrétion. Si cette influence de l'électricité était une action chimique, les courants voltaïques continus seraient bien plus propres à la provoquer que les courants induits discontinus; or l'expérience a démontré le contraire. Il y a plus; on a essayé de faire passer du sang, au moyen de l'électricité voltaïque, à travers des organes sécréteurs, tels que le foie, les reins, etc., séparés du corps de l'animal et par conséquent privés de vie, et on n'a jamais obtenu que le même produit, savoir, un liquide identique résultant de la décomposition électro-chimique du sang[1]; ce qui prouve que ces organes n'agissent dans ce cas que comme de simples conducteurs humides. Toutefois, quel que soit le mode d'action de l'électricité, il n'en est pas moins constant qu'elle agit d'une manière remarquable sur la sécrétion lactée, c'est ce qui résulte d'une observation de M. Aubert, répétée et vérifiée par M. A. Becquerel sur une jeune femme de vingt-sept ans, chez laquelle, à la suite d'émotions répétées, la sécrétion lactée diminua dans le sein droit et se tarit à peu près complétement dans le sein gauche. On appliqua des courants induits d'une médiocre intensité à ce dernier sein; on leur faisait traverser la glande mammaire à l'aide des électrodes munis d'éponges humides, placés sucessivement dans les divers points de la surface du sein, et de manière que les courants pénétrassent dans presque toutes ses parties. On fit trois séances de quinze minutes chacune; dès la première, la montée du lait se fit dans la soirée; elle continua dès lors sans cesse, et le soir du troisième jour le lait était abondant dans le sein gauche.

[1] Ces faits sont le résultat d'expériences que nous avions faites, M. Macaire et moi, en 1824, et que nous n'avons jamais publiées.

Depuis cette époque, la jeune femme n'a pas cessé d'avoir du lait en abondance, et l'enfant, qui avait souffert de la suppression momentanée de sa nourriture, s'est promptement rétabli et a continué à venir très-bien.

Il paraîtrait que ce n'est pas seulement sur la sécrétion lactée que l'électricité peut agir ; M. Ludwig a démontré en effet, au congrès scientifique de Vienne en 1856, qu'elle augmente en général la quantité des liquides sécrétés, qu'elle détermine, par exemple, une augmentation considérable de la sécrétion des glandes salivaires, en étant appliquée méthodiquement sur ces glandes. Ce genre d'application nous paraîtrait digne d'être étudié avec soin, car il pourrait rendre d'importants services.

Si, comme nous l'avons dit, c'est plutôt à ses propriétés physiologiques qu'à ses propriétés chimiques, qu'il faut rapporter l'effet de l'électricité sur les sécrétions, il n'en est plus de même quand il s'agit des tentatives qu'on a faites de l'employer à dissoudre les calculs de la vessie. La première idée de cette application appartient au docteur Harle de Norwich, mais les premiers essais qui en ont été faits sont dus à MM. Prevost et Dumas; ils les ont dirigés, non pas en vue d'extraire le calcul, mais en vue de détruire l'état d'agrégation qui lie ses molécules entre elles, parce qu'une fois devenu friable, il sortirait facilement. Ils se sont assurés d'abord, en appliquant sur le calcul même plongé dans l'eau, les fils de platine servant de pôles à une pile assez forte, que le calcul se décomposait, ou plutôt se réduisait en une poussière fine telle qu'au bout d'une double opération de seize heures, les fragments les plus volumineux n'étaient pas de la grosseur d'une lentille et pouvaient par conséquent passer au travers du canal de l'urètre; cependant le calcul très-compacte pesait 92 grains avant l'expérience. Le point principal sur lequel ont porté ensuite les recherches de MM. Prevost et Dumas a été de déterminer tout ce qui touche à la sensibilité de la vessie dans ce genre d'opération, afin de savoir jusqu'à quel point elle serait praticable sur l'homme vivant. Ils ont cru pouvoir conclure d'expériences faites sur des chiens, qu'il serait possible d'introduire dans la vessie les deux

conducteurs servant d'électrodes à un courant voltaïque et d'y produire une abondante décomposition chimique, sans blesser cet organe, ni l'affecter d'une manière fâcheuse. Mais, tout en voyant que leur méthode était susceptible d'application, ils ont reconnu qu'elle ne peut offrir aucun avantage pour l'extraction des calculs qui ne sont pas des composés salins tels que des phosphates alcalins, mais qui se composent en totalité ou en grande proportion d'acide urique. Il serait donc essentiel, avant tout, de s'assurer de la nature des calculs Quant au liquide à introduire dans la vessie, ils ont trouvé qu'il y avait de l'avantage, pour faciliter la dissolution du calcul, à substituer à l'eau une dissolution de nitrate de potasse C'est ce qu'a constaté plus tard, par une serie d'expériences, M. Bonnet, chirurgien en chef de l'Hôtel-Dieu à Lyon. Il a successivement placé plusieurs calculs de nature différente entre deux électrodes de platine, en les plongeant dans une dissolution de nitrate de potasse (4 gros dans 4 onces d'eau), et il a réussi à les détruire partiellement en les faisant traverser par le courant pendant un temps plus ou moins long. Les calculs d'oxalate de chaux sont les seuls qui ont résisté à l'action ; les autres se dissolvent plus ou moins vite ; l'effet le plus prompt a été obtenu sur un calcul ammoniaco-magnésien ; toutefois les réactions, en général, sont faibles et lentes, ce qui rend l'opération plus difficile sur le vivant ; cependant le point que M. Bonnet a résolu d'une manière satisfaisante, c'est de pouvoir porter sur les calculs urinaires, au moyen de la décomposition électro-chimique d'une dissolution saline, des acides ou des alcalis, sans que les réactifs puissent se répandre dans l'urine que contient la vessie. Le docteur Bence Jones a repris ce sujet qu'il a enrichi de nouvelles observations intéressantes sur la dissolution des calculs au moyen du courant voltaïque ; il a trouvé, après bien des essais, qu'une dissolution plus ou moins concentrée de nitrate de potasse était, dans presque tous les cas, le liquide dans lequel il valait le mieux plonger le calcul, quelle que fût sa nature, pour obtenir un prompt et bon résultat ; il a réussi même à dissoudre assez complétement des calculs d'oxalate de chaux, pourvu qu'ils renferment aussi des phosphates, tandis que s'ils contiennent

des urates, et surtout s'ils ne sont que des oxalates, leur dissolution est beaucoup plus difficile.

Malgré toutes les expériences que nous venons de rapporter, la dissolution des calculs dans la vessie même n'a pas encore été tentée, ou, du moins, si elle l'a été, ce que nous ignorons, les résultats de l'opération n'ont pas été heureux, puisqu'on en est toujours, pour le traitement de ce genre de maladie, à l'opération si remarquablement perfectionnée maintenant, de la lithotritie. Ce résultat négatif ne nous étonnerait pas, car, en introduisant dans la vessie d'abord une dissolution de nitrate de potasse, et ensuite les électrodes, il nous semble que c'est beaucoup plus sur le nitrate que sur le calcul que doit agir le courant; et, en supposant qu'on agisse sur le calcul indirectement, c'est-à-dire par l'effet de l'acide nitrique et de la potasse dégagés respectivement aux deux électrodes en contact avec le calcul, nous pensons que la présence de ces deux corps dans la vessie ne doit pas être innocente. La circulation d'un courant électrique, aussi fort que celui qui est nécessaire, ne doit pas être non plus sans danger.

Une autre application thérapeuto-chimique de l'électricité est relative à l'extraction des métaux introduits et séjournant dans l'organisme, qu'ils aient été pris, soit sous la forme de remèdes, soit par absorption dans les arts et métiers qui exigent leur emploi. C'est à M. Poey qu'est due l'idée de cette application, qu'il a réalisée en plongeant le malade jusqu'au cou dans une baignoire métallique, isolée du sol, où il est étendu horizontalement sur un banc de bois, de toute la longueur de son corps qui ainsi ne se trouve point en contact immédiat avec le métal de la baignoire. On acidule l'eau avec de l'acide nitrique ou de l'acide hydrochlorique pour l'extraction du mercure, de l'argent ou de l'or, et avec de l'acide sulfurique pour l'extraction du plomb. On met en contact le métal de la baignoire avec le pôle négatif de la pile, et on fait tenir au malade le pôle positif, tantôt de la main droite, tantôt de la gauche. Suivant M. Poey, le courant électrique, en traversant le corps qui est dans le bain, entraîne avec lui les particules métalliques qui s'y trouvent, et les dépose sur le métal de la baignoire ; il affirme qu'on a trouvé

des traces de mercure et de plomb dans le liquide, après avoir soumis à ce traitement des personnes chez lesquelles on savait d'avance que ces deux métaux devaient se trouver. Nous avouerons sans peine que nous avons beaucoup de doutes sur la réalité de ce mode de traitement; nous ne concevons pas d'abord comment le courant électrique peut amener dans le liquide du bain des molécules métalliques qui, d'après les lois de la décomposition électro-chimique, doivent ne se déposer que sur les surfaces métalliques des électrodes. De plus, il nous paraît difficile que ce courant en circulant dans tout l'organisme, aille passer exactement dans les points du corps où se trouvent en si petite quantité les métaux qu'il s'agit d'extraire. Le sujet a donc besoin, à notre avis, d'être étudié de nouveau, en étant l'objet d'expériences nombreuses et précises, ce qui n'est pas impossible.

L'emploi de l'électricité pour opérer la résolution des tumeurs, et en particulier de celles qui résultent de la tuméfaction des ganglions, a été tenté à plusieurs reprises[1]. On s'est borné quelquefois à agir extérieurement au moyen de l'électrisation cutanée, qui n'est, au fond, comme nous l'avons fait déjà remarquer, qu'un stimulant de la peau, du même genre que tant d'autres. M. Boulu, dès l'année 1853, a essayé de faire pénétrer l'excitation électrique dans l'épaisseur même de la tumeur, en agissant en même temps sur toute sa surface, et en la cernant à sa circonférence, de manière à l'isoler des parties voisines, et à borner, autant que possible, l'action des courants aux tissus malades. Il fait arriver ces courants au moyen de deux demi-disques métalliques à surface granulée ou garnie de pointes mousses, fixés à des plaques d'ivoire de manière à ne pas être en communication électrique, et recevant chacun un des fils conducteurs de l'appareil. L'application des disques se fait avec une certaine énergie sur la peau; on agit ainsi à la

[1] M. le docteur Despine d'Aix a remarqué que l'électricité, telle qu'on la tire simplement d'une machine électrique sous forme d'étincelles, est précieuse, comme moyen adjuvant, pour guérir des dartres qui sont traitées en même temps par les eaux minérales.

fois dans l'épaisseur de la tumeur et à sa surface. On peut aussi faire pénétrer dans la tumeur de fines aiguilles de platine, qui servent d'électrodes aux courants, suivant la méthode de l'acupuncture. M. Boulu cite un assez grand nombre de cas dans lesquels il a réussi en opérant suivant les modes indiqués avec des courants d'induction, à faire disparaître ou à réduire considérablement, soit des tumeurs lymphatiques, soit des engorgements ganglionnaires. L'effet de l'électricité ne peut être ici un effet purement chimique, c'est plutôt un effet excitant, comparable aux autres genres d'excitation qu'on emploie dans le traitement de ce genre de maladie. L'excitation électrique active la circulation, redonne la vie aux tissus, en un mot, tend à les replacer dans leur état normal; et quoiqu'elle produise ici un résultat opposé en apparence à celui qu'elle donne dans la guérison des atrophies, cependant elle agit par le même principe, et non pas en vertu d'une action dissolvante électrochimique ou électro-calorifique. Du reste, M. A. Becquerel n'est pas disposé à croire, avant que de nouveaux faits un peu nombreux l'aient démontrée, à l'efficacité du traitement électrique dans les tumeurs cervicales, du moins dans toutes; car, s'il est possible d'obtenir quelques bons résultats par ce traitement, quand il s'agit de tumeurs provenant d'une inflammation chronique des ganglions (*adénite chronique*), il n'en est plus de même quand les tumeurs sont constituées par la dégénérescence tuberculeuse des ganglions.

Le traitement des anévrismes par l'électricité, dont nous avons déjà dit un mot dans le § 2, présente plus de chances de succès. Il est fondé sur la propriété que possède le sang traversé par un courant électrique, de se coaguler à l'électrode positif, comme cela a lieu également pour l'albumine, probablement par l'effet secondaire d'un acide dégagé à cet électrode dans la décomposition d'un sel que renferment le sang et l'albumine. C'est M. Petrequin, ainsi que nous l'avons déjà dit, qui obtint le premier un succès, et qui l'attribua avec raison à l'action décomposante de la pile, indiquant ainsi qu'il faut se servir d'un courant continu, produit par une pile composée de couples nombreux, mais faiblement chargés. On fait pénétrer

le courant dans la tumeur anévrismale au moyen d'aiguilles de platine qu'on y implante; on peut se borner à n'implanter que l'aiguille qui sert d'électrode positif, et appliquer l'électrode négatif, sous forme de plaque, sur la peau. Il faut que l'aiguille positive pénètre au centre de la tumeur, et que la plaque métallique négative soit placée à son extrémité. Il suffit d'une pile à auges de 20 couples faiblement chargés pour produire le courant; la durée de la séance doit être d'une demi-heure. La méthode que nous venons de décrire a été employée avec succès dans un très-grand nombre de cas; nous devons cependant remarquer qu'elle est souvent très-douloureuse, et qu'elle n'est pas à l'abri de quelques inconvénients pouvant provoquer des accidents tels que l'inflammation des bords de la piqûre, ainsi que leur ulcération et la production de petites escarres le long du trajet de ces piqûres. Aussi faut-il surtout l'appliquer aux nombreux anévrismes que leur siége spécial soustrait à la compression directe, et même à la ligature; ajoutons que si elle a produit souvent de bons résultats dans le traitement des anévrismes traumatiques du coude, il ne faut pas se dissimuler que ces anévrismes cèdent facilement à beaucoup de traitements fondés sur d'autres méthodes.

Il ne nous reste plus à parler que d'un seul des effets thérapeutiques indirects de l'électricité qu'on ait jusqu'ici employés dans la pratique médicale; c'est celui qui, fondé sur les propriétés calorifiques du courant électrique, est désigné sous le nom de *galvano-caustique*.

On sait que la cautérisation est une opération qui a pour but l'*ustion* ou l'*escarification* des parties organisées; elle se distingue en *actuelle* et *potentielle*, suivant qu'on la pratique avec le feu ou avec les caustiques. La cautérisation est *directe*, lorsqu'on la pratique sur le lieu même du mal, et *indirecte* ou révulsive quand on l'exécute sur des tissus sains, plus ou moins éloignés du mal, afin d'obtenir un puissant effet de révulsion ou de dérivation. L'application des cautères à la nuque, dans les cas d'encéphalites chroniques, celle d'un moxa sur le trajet d'un cordon nerveux atteint d'une névralgie rebelle, celle d'un exutoire au bras, rentrent dans cette classe de cautérisation.

Quant à la cautérisation directe, elle est *destructive*, quand elle est accomplie en vue de la destruction d'une tumeur, d'une membrane; elle est simplement *modificatrice*, quand on s'en sert uniquement pour modifier la vitalité des tissus, pour changer l'état des parties sur lesquelles on la fait agir, comme par exemple, quand on opère l'attouchement léger d'une plaie, d'une membrane muqueuse enflammée, avec la pierre infernale. Les agents thérapeutiques que l'on a employés pour opérer la cautérisation sont extrêmement nombreux; on peut les classer sous deux chefs principaux, savoir : les agents de cautérisation, qui produisent la mortification des tissus par le calorique dont ils sont empreints, et ceux qui les mortifient en agissant chimiquement sur eux. Les premiers, quoique bien moins nombreux que les seconds, sont pourtant de différentes espèces; ce sont des métaux (on emploie plus particulièrement le fer et l'acier) qu'on chauffe fortement [1] dans un brasier ardent, et auquel on donne différentes formes suivant l'usage particulier qu'on a en vue; ce sont des moxas, c'est-à-dire une substance inflammable, une couche de coton cardé, par exemple, de forme cylindrique, qu'on place sur la partie du corps qu'on veut cautériser, et au sommet de laquelle on met le feu, en ayant soin de la laisser brûler jusqu'à son entière combustion; ce sont enfin quelquefois des rayons solaires réunis en un seul foyer au moyen d'une ou plusieurs lentilles; quelquefois encore on se sert d'eau ou d'huile bouillante, mais on préfère maintenant, quand on ne veut pas opérer une forte cautérisation, approcher du siége du mal, ou un charbon allumé, ou une plaque de fer rouge, jusqu'à la distance nécessaire pour obtenir la chaleur voulue.

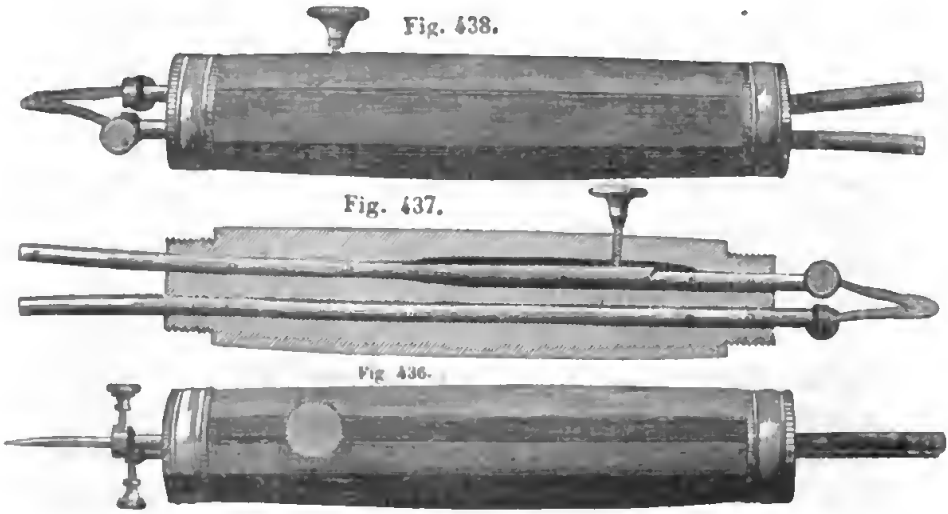
La cautérisation par les métaux incandescents étant l'une des plus usitées, on a eu l'idée d'employer les courants électriques pour produire ce réchauffement. Le docteur Fabre-Palaprat est le premier qui se soit servi d'un fil de platine, chauffé

[1] Les anciens étaient dans l'usage d'employer des fers légèrement chauffés; cette pratique a été abandonnée, vu qu'il vaut beaucoup mieux ne se servir que de cautères excessivement chauds, qui présentent la coloration rouge-blanc, parce qu'ils font bien moins souffrir que s'ils étaient seulement rouges.

par une pile voltaïque, pour produire des moxas. Longtemps après, en 1845, M. Heider employa le même moyen, d'après le conseil du professeur Steinheill, pour cautériser les nerfs dentaires douloureusement affectés. En 1846, M. Crusell, de Saint-Pétersbourg, imagina de couper et de cautériser les tissus au moyen d'un fil ou d'une lame mince de platine rendus incandescents par un fort courant électrique, en les faisant agir à la façon d'une scie au moyen d'un mouvement de va-et-vient. Ce mode de cautérisation se répandit bientôt en Angleterre, et M. J. Marshall en fit l'objet de nombreuses expériences, d'abord sur des cadavres et sur des animaux, et ensuite sur des malades, après avoir constaté la possibilité de cautériser ainsi les tissus. Il parvint de cette manière à guérir une fistule de la joue au moyen d'un fil de platine d'un demi-millimètre de diamètre, rendu fortement incandescent par le courant électrique, auquel il avait donné la forme d'une anse qui fut introduite dans la cavité du sinus fistuleux; plus tard, il se servit du même procédé pour détruire d'autres fistules, des tumeurs de petit volume, et pour cautériser des plaies, etc. M. Nélaton en a fait, à partir de 1850, l'application à la cure des tumeurs érectiles sous-cutanées, ce qui permet de détruire ces tumeurs en conservant la peau. M. le docteur Amussat fils a pu également, au moyen d'un fil de platine d'un demi-millimètre environ et de 20 à 25 centimètres de longueur, chauffé totalement par le courant d'une pile de Bunzen, cautériser, soit extérieurement, soit intérieurement, plusieurs organes importants, et faire l'ablation de tumeurs cancéreuses; il s'est servi également de lames minces, soit rubans de platine, qu'il faisait chauffer de la même manière, et auxquels, comme aux fils, pour opérer la section des tissus, il imprimait un mouvement de va-et-vient, comme l'avait fait Crusell.

Tels sont, en résumé, les divers essais, plus ou moins heureux de galvano-caustique qui avaient été tentés, quand parut, en 1855, un ouvrage important sur ce sujet du docteur Middeldorpff de Breslau. Les instruments qu'il emploie sont désignés par lui sous les noms de *cautères galvaniques*, de *porte-ligature galvanique*, de *sétons galvaniques*.

Le *cautère galvanique* dont on se sert aujourd'hui communément en Allemagne pour cautériser ou diviser les tissus, se compose d'un manche de bois d'un certain volume, coupé longitudinalement en deux parties égales, assujetties par une virole à chaque extrémité; ce manche est traversé dans toute sa longueur par deux tiges métalliques de cuivre doré, ouvertes à leurs extrémités pour recevoir le fil conducteur du courant électrique, et, d'une autre part, le ruban ou fil de platine, long de 28 millimètres sur 1 de diamètre, destiné à devenir incandescent, et auquel on peut donner la forme arrondie, ou bien celle d'un bec d'oiseau, suivant qu'on veut s'en servir pour cautériser des surfaces planes ou inciser des trajets fistuleux. La fixité des fils ainsi engagés est maintenue par des vis de pression. L'une des tiges de cuivre qui traverse le manche est brisée, et l'une de ses deux portions tend à s'écarter de l'autre, lorsqu'elle est en liberté, grâce à la largeur, en cet endroit, de la gouttière qui la loge. Lorsqu'on veut établir la continuité de ses deux fragments, une vis de pression sert à en opérer le contact. Avec cet instrument, on peut porter le fil de platine sur le lieu même qu'il s'agit de cautériser, le rendre aussitôt après incandescent, et l'utiliser ensuite froid, par suite de la disposition de cette tige, qui permet d'interrompre, quand



on veut, le courant électrique. Les figures 436 et 438 représentent cet instrument vu de profil et de face; la figure 437 le représente avec la moitié du manche enlevée, pour mettre à nu les conducteurs qui le traversent.

Le *porte-ligature galvanique* consiste dans des fils qu'on fait passer, soit dans des tubes de verre, soit dans des tubes métalliques et bons conducteurs, mais isolés l'un de l'autre; l'anse coupante fait saillie à l'extrémité du tube; les fils qui passent à travers les tubes permettent de donner à l'anse terminale le volume et l'étendue que l'on désire.

Les *sétons galvaniques* sont des fils de platine de différentes grosseurs, que l'on conduit au moyen d'aiguilles droites ou courbes à travers les canaux ou tissus dans lesquels il s'agit de développer un travail inflammatoire.

Les avantages de la galvano-caustique sont, d'après M. Middeldorpff, l'absence d'hémorrhagie, la rapidité et l'énergie d'action, la limitation exacte des effets de l'opération, la possibilité de brûler et de couper des parties profondes, qui sont absolument inaccessibles à tout instrument tranchant, enfin la production de bourgeons charnus de bonne nature. Le nombre des cas auxquels ce traitement est applicable serait, d'après le docteur allemand, très-considérable. Ce seraient, entre autres, les hémorrhagies qu'il permet d'arrêter là où le fer rouge ne peut pénétrer, les névralgies dans lesquelles il convient ou de détruire le nerf (comme pour le nerf dentaire), ou de cautériser certaines parties de la surface du corps (comme dans le cas de la sciatique), quelques paralysies, la gangrène des ulcérations, les cancers, mais surtout les fistules, dont plusieurs exemples de guérison sont cités. Plusieurs autres cas sont encore énumérés, tels que ceux de tumeurs vasculaires, de polypes de différentes espèces, dont la galvano-caustique favorise l'ablation en la rendant possible là où les instruments ordinaires ne peuvent pas pénétrer; des amputations même peuvent être opérées par cette méthode, en employant un courant électrique très-intense qui réchauffe fortement le fil ou la lame de platine. Ainsi, on a pu opérer par la ligature incandescente la section d'un deuxième pouce bien complet,

qui adhérait par une soudure osseuse au pouce droit d'un enfant de six mois, au-dessous de l'articulation métacarpo-phalangienne; on opéra ainsi la section non-seulement des parties molles, mais encore de l'os, dont le volume égalait celui d'une plume de pigeon; l'enfant guérit rapidement.

Sans nous arrêter à tous les cas que M. Middeldorpff indique comme susceptibles d'être traités par la galvano-caustique, et tout en reconnaissant qu'il y a à cet égard de l'exagération, nous croyons que ce nouveau mode de cautérisation offre certains avantages incontestables. Sans doute, il est des cas où il est inférieur au fer rouge ou aux caustiques, vu qu'il peut donner quelquefois lieu à des hémorrhagies et qu'il ne cautérise souvent les tissus qu'e très-superficiellement; mais il ne faut pas conclure de ces cas, comme l'ont fait quelques auteurs, qu'il ne puisse être employé avec succès que lorsqu'il s'agit de modifier la vitalité des tissus plutôt que de les détruire. M. J. Regnauld, que nous avons déjà eu souvent l'occasion de citer dans le cours de cet ouvrage, nous paraît avoir, à la suite d'observations très-bien faites, parfaitement bien précisé les limites entre lesquelles l'usage du cautère électrique peut être avantageux; en même temps qu'il a signalé les conditions auxquelles il ne peut satisfaire, et les circonstances où son usage paraît offrir des difficultés presque insurmontables.

La faible masse de platine qu'on peut réchauffer par un courant électrique, à moins d'employer des piles d'une puissance hors de proportion avec le but qu'on se propose d'atteindre, rend impossible l'emploi du cautère électrique toutes les fois qu'il s'agit de détruire des tissus volumineux. Il semble, il est vrai, que le fil de platine traversé constamment par le courant électrique ne se refroidit point comme un cautère ordinaire rougi à blanc par le feu, et qu'il peut ainsi compenser, par la continuité de son action, ce qui lui manque sous le rapport de la masse. Mais il faut remarquer que le contact de tissus baignés de liquide empêche le fil d'arriver à la haute température qu'il aurait dans l'air, et cela, non-seulement en lui ôtant sa chaleur, mais en le rendant, par l'effet de ce re-

froidissement, meilleur conducteur, et par conséquent moins susceptible de s'échauffer sous l'action du courant. Certainement il n'est pas impossible de faire rougir à blanc un fil de platine au sein des tissus gorgés d'humidité; mais on est entre deux écueils opposés, ou de ne pas réchauffer le fil suffisamment ou de risquer de le fondre; cette fusion s'opère dans la petite partie du fil qui sort à ras de la peau et qui s'échauffe d'autant plus que la portion qui est plongée dans les tissus s'est refroidie davantage par le contact des liquides[1]. Lors même que le fil, tout en se réchauffant beaucoup ne fondrait pas dans ses points d'entrée et de sortie, il ne cautérisera que ces points et non l'intérieur comme on serait disposé à le croire. Cet inconvénient se vérifie pour toutes les opérations dans lesquelles le fil de platine doit rester plongé dans les tissus (cautérisation de longs trajets fistuleux, excision et ablation de tumeurs volumineuses). M. Regnauld, tout en ne rejetant pas d'une manière absolue, même dans ces derniers cas, l'emploi des cautères électriques, estime que ce genre d'appareils dont l'avantage incontestable, résultant de leur faible masse, est de pouvoir les porter aux plus hautes températures, sans avoir à redouter les effets du rayonnement sur les parties voisines de celles qu'on veut détruire, possède une grande supériorité sur les autres moyens pour les cautérisations exercées sur des surfaces peu étendues, situées dans le voisinage d'organes délicats ou dans la profondeur de quelques cavités naturelles. Il croit également, d'après son expérience, que le mode le plus sûr d'application consiste à répéter successivement les contacts du stylet incandescent et de la partie sur laquelle on opère.

Nous croyons utile de donner encore en terminant quelques détails sur la manière d'opérer la galvano-caustique, dont l'emploi, nous en sommes convaincu, tend à devenir toujours plus général pour les cas du moins où elle est évidemment supérieure aux anciens procédés. L'un des points essentiels est de pouvoir chauffer à blanc des conducteurs de volume très-

[1] Voyez, pour ce genre de phénomène, tome II, page 185, au bas.

variable; il faudrait donc que l'opérateur eût à sa disposition des piles de forces très-variables elles-mêmes. M. Middeldorpff, qui se sert de couples de Grove, a réussi à les combiner de manière, qu'au moyen d'un commutateur, il peut se procurer immédiatement et à volonté un courant plus ou moins puissant en intensité et en quantité, et obtenir ainsi l'incandescence du fil et de la lame de platine dont il a besoin. Nous croyons qu'on pourrait apporter à cette partie de l'appareil un grand perfectionnement en ayant une pile d'un plus petit volume que la pile de Grove, d'un maniement plus commode et d'une force suffisamment variable pour parer aux besoins dont il s'agit; ce serait un objet intéressant de recherche pour les physiciens que de trouver une pareille pile; nous ne croyons pas que ce fût bien difficile, surtout dans ce cas où le prix de revient a peu d'importance. Le grand avantage de la galvano-caustique est qu'on peut manier les cautères électriques avec une tranquillité et une précision bien différentes de la précipitation inséparable jusqu'ici de la cautérisation au fer rouge. Ainsi, lorsqu'on veut cautériser le fond d'une cavité, on introduit l'instrument à froid lentement, doucement; puis, lorsqu'on s'est bien assuré qu'il est exactement en place, on appuie sur le bouton de l'appareil (fig. 438), ce qui ferme le circuit qui était resté ouvert; et immédiatement après, le courant passe et la cautérisation commence; on l'arrête par l'opération inverse. C'est, comme nous l'avons vu, la disposition du platine et sa forme (tantôt lame, tantôt fil) qui établit les principales différences entre les instruments galvano-caustiques de M. Middeldorpff. M. Broca, qui a fait un rapport très-intéressant à la Société de chirurgie de Paris sur ce sujet, décrit des cas d'amputation sur des animaux, opérés par l'anse coupante, qui montrent que, pour éviter l'écoulement du sang, il ne faut pas chauffer trop fortement le fil, et que, par conséquent, il est nécessaire d'opérer avec une pile d'une force moyenne. Il cite encore trois cas différents de cautérisation galvanique opérés, deux par M. Middeldorpff, le troisième, par lui-même, qui ont été suivis d'un plein succès. Suivant lui, cette cautérisation ne met pas seulement à l'abri des hémorrhagies primi-

tives, mais elle paraît encore conjurer la chance des hémorrhagies consécutives, et elle présente, sur l'emploi du fer rouge, la grande supériorité d'être incomparablement moins effrayante pour les malades, en supprimant cet appareil terrible de la cautérisation ordinaire.

Comme on le voit, les praticiens ne sont pas encore complétement d'accord sur la portée de la galvano-caustique, que les uns restreignent à un petit nombre de cas, tandis que les autres en étendent beaucoup l'usage. Quant à nous, nous croyons à ce procédé opératoire un assez grand avenir, à cause de sa simplicité et de sa commodité; mais nous estimons aussi qu'il ne faut en faire usage qu'avec une extrême prudence, surtout tant que son emploi ne sera pas généralisé davantage.

§ 5. Effets physiologiques de l'électricité atmosphérique.

Nous avons déjà[1] parlé des effets mortels que produit la foudre sur les hommes et sur les animaux, et des particularités remarquables qui les accompagnent. Ces effets ne sont pas les seuls; M. Boudin, qui a fait une étude particulière des effets de la foudre sur l'homme, y distingue trois sortes de phénomènes. 1° guérison d'affections préexistantes; 2° production de blessures et d'infirmités; 3° mort. Parmi les affections dont la foudre produit la guérison, on trouve des exemples d'affections rhumatismales, de paralysies des membres, d'amaurose et de surdité[2]; tous ces cas, qui sont très-rares, sembleraient prouver qu'une forte décharge électrique artificielle, telle que celle d'une batterie de bouteilles de Leyde, serait capable d'opérer la guérison de certaines affections; mais les chances de danger

[1] Tome III, page 147.

[2] M. Guerard raconte, d'après Tulpius, qu'un jeune homme, muet depuis trois ans, à la suite de l'ablation de la moitié de la langue, ressentit un grand mouvement dans les muscles de cet organe au moment où il vit briller un éclair suivi d'un violent coup de tonnerre, et recouvra immédiatement la parole. (*Dictionnaire de Médecine ou Répertoire des sciences médicales.* Paris, 1835, tome XI, article *Électricité*, page 218.)

sont tellement plus grandes que celles de guérison, qu'on n'oserait conseiller de recourir à un semblable moyen. En effet, parmi les affections morbides que produit la foudre, il est assez remarquable, qu'indépendamment de beaucoup d'autres, on retrouve toutes celles que l'électricité guérit, telles que paralysie passagère ou persistante des membres, amaurose, surdité, avec ou sans perforation du tympan; puis, en outre, brûlures plus ou moins étendues, exanthèmes divers, épilation partielle ou totale du corps, hémorrhagies nasales, buccales, auriculaires, cataracte, mutisme, imbécillité, avortement. Nous ne nous arrêterons pas à la description de ces divers accidents, qui ont été constatés plus d'une fois, et qui ont été traités par les procédés thérapeutiques ordinaires; nous nous bornerons à insister sur les cas de mort et sur les circonstances curieuses qu'ils présentent souvent.

Il arrive quelquefois que la mort n'est qu'apparente; M. Boudin cite l'exemple d'un homme foudroyé, qui ne manifesta quelque apparence de vie qu'après cinq quarts d'heure, malgré tous les secours qu'on lui avait prodigués. Cependant il finit par reprendre sa connaissance, et avec elle, toute la force de son intelligence; mais sa vue était totalement abolie, toutes les diverses parties de son corps ne semblaient plus lui appartenir, tant les sensations étaient obtuses et les mouvements difficiles. Au bout de trois semaines, les brûlures nombreuses étaient encore très-vives, le pouls petit, fréquent, irrégulier, le sommeil était agité; pendant le jour, assoupissement presque continuel, lourd et fatigant, céphalalgie frontale, s'étendant parfois jusqu'à l'occiput. Une chose remarquable, c'est que les sens de l'odorat, du goût, et surtout de l'ouïe, avaient acquis plus de délicatesse. L'anéantissement était complet; il y avait une véritable résolution des forces musculaires; tout le corps, dans les déplacements qu'on lui faisait subir, était comme une masse inerte, obéissant au gré de la pesanteur, des crampes douloureuses s'y manifestaient assez fréquemment, surtout pendant la nuit. Grâce à un traitement énergique, bains, sulfate de quinine administrés tous les jours, application fréquente de sangsues derrière les oreilles, emploi même de l'électricité près

d'une plaie, ce qui avait produit un soulagement immédiat, le malade avait fini par se rétablir peu à peu ; ce n'est qu'au bout de trois mois que l'état de son toucher, qui avait été très-altéré, redevint à peu près normal, que la transpiration qui avait été jusqu'alors complétement nulle, reparut, et qu'il retrouva la conscience d'une solidarité d'union entre ses différents membres. La vision, qui avait été rétablie, mais très-imparfaitement pour un seul œil, au bout de huit jours après l'accident, finit par revenir aussi pour le second œil. Enfin, au bout de quatre mois, la guérison étant bien avancée, le traitement cessa, et le rétablissement finit par devenir complet.

Revenant aux cas de mort, rien n'est plus variable que les circonstances qui les accompagnent. Tantôt l'individu foudroyé est tué roide sur place, le mort restant dans la position où il était, assis, debout ou à cheval ; tantôt il est lancé à une distance considérable. Tantôt la foudre déshabille complétement les victimes et emporte le corps ; tantôt, au contraire, elle brûle, désorganise le corps, et laisse intacts les vêtements. Tantôt le corps du foudroyé semble braver les lois de la décomposition ; tantôt, au contraire, la plus rapide et la plus horrible putréfaction s'empare immédiatement du cadavre. Les mutilations chez l'homme, avec séparation de parties du corps, accompagnent rarement la mort occasionnée par la foudre ; sur plusieurs centaines d'observations d'individus foudroyés, M. Boudin dit n'avoir rencontré que six cas de mutilation proprement dite ; mais, dans ces six cas, se trouvent quatre arrachements partiels ou totaux de la langue. La proéminence des yeux est citée par plusieurs auteurs comme un phénomène qui est observé fréquemment sur les individus foudroyés. On remarque aussi quelquefois sur eux un petit trou au crâne et même, mais plus rarement, la fracture complète de la partie osseuse de la tête. Quant aux désordres dans les organes intérieurs, tels que les poumons, le cœur, les intestins, etc., ils s'observent souvent, soit isolés, soit concurremment avec les autres affections. Rien, en un mot, n'est plus variable que l'état du corps, après la mort, chez les individus frappés par la foudre. Cela tient, en grande partie, très-probablement, à la route que suit

l'électricité dans son trajet à travers le corps; route qui elle-même dépend de la direction suivant laquelle arrive l'électricité, de l'attitude de l'individu, et de la position relative de ses membres, à l'instant même où la foudre le frappe, du degré plus ou moins grand de conductibilité électrique des diverses parties de son corps [1] et de ses vêtements, et enfin aussi des circonstances extérieures au milieu desquelles il se trouve, telles que son isolement ou son rapprochement d'objets conducteurs ou isolants. Mais tous ces éléments qui concourent à la production des effets spéciaux qui accompagnent le phénomène général, sont presque toujours très-difficiles à déterminer, et ne peuvent, par conséquent, être facilement étudiés en vue d'être expliqués.

Une question intéressante et qui n'est pas encore résolue, est de savoir comment la foudre tue, quand du moins le cadavre ne présente aucune lésion organique, à laquelle on puisse attribuer indirectement la mort de l'individu frappé. M. Brown-Séquard, qui s'est beaucoup occupé de ce sujet, part du principe que toute cause d'excitation des forces nerveuses, musculaires, etc., agit de manière à diminuer d'autant plus la quantité de ces forces qui se trouvent, à un moment donné, chez un individu, que cette excitation est plus énergique; tous les faits connus démontrent l'exactitude de cette loi. Il en ressort que la foudre, en tant que cause d'excitation extrêmement puissante, déterminera la dépense de toute la quantité des forces nerveuses, musculaires, etc., chez les individus qu'elle frappera; ces forces anéanties, on comprend parfaitement bien que la vie doive cesser aussitôt, parce qu'aucun des actes vitaux de quelque importance ne saurait s'accomplir en l'absence de ces forces. Ainsi donc la foudre tue en épuisant toute la quantité de forces dynamiques que possède l'économie animale, ce qui explique la mort qui a lieu en l'absence de toute lésion vi-

[1] Il existe certains individus qui jouissent d'une espèce d'immunité contre la foudre, ce qui tient probablement au défaut de conductibilité électrique de leur corps. Le même fait a été observé assez fréquemment sur les personnes placées dans la chaîne qu'on forme, pour faire passer la décharge d'une bouteille de Leyde, et qui ne la transmettent pas.

sible des organes. Cette explication, qui s'applique surtout aux cas de mort produits par le choc en retour [1], nous paraît devoir être complétée par un examen un peu plus précis de la manière dont la foudre peut épuiser, comme le dit M. Brown-Séquard, les forces dynamiques de l'économie animale. Il est évident que la puissante décharge électrique, sous l'influence de laquelle se trouve le corps vivant, imprime à la fois aux molécules de tous les nerfs, comme à celles de tous les muscles, une disposition différente de celle qu'elles possèdent sous l'action de la force vitale et analogue à celle qu'on détermine par le passage d'une décharge ou d'un courant artificiels, à une partie seulement des muscles et des nerfs. La généralité, jointe à l'intensité de l'action électrique, dans le cas où elle est déterminée par la foudre, doit produire à la fois une suspension momentanée, mais générale, de l'exercice de la force vitale et une désorganisation moléculaire des muscles et des nerfs, qui empêche cette force de reprendre son empire [2], et par conséquent la fait disparaître définitivement, puisqu'elle n'a plus de moyen de se manifester. La putréfaction qui survient si vite dans le cas qui nous occupe, chez les individus foudroyés, est une preuve très-forte en faveur de l'explication que nous venons de donner; car ce qui retarde en général, après la mort, la décomposition, c'est la lutte qui existe encore quelque temps entre la disposition que les molécules organiques avaient prise sous l'influence de la force vitale et la disposition qu'elles doivent prendre quand elles n'obéissent plus, comme les molécules de la matière inorganique, qu'aux forces physiques ordinaires et en particulier aux forces électriques dont elles sont naturellement douées. Or, cette lutte ne peut plus exister après

[1] Tome III, page 149.

[2] L'effet de la foudre, dans le cas qui nous occupe, serait bien difficile à comprendre si ce n'était pas au moyen de l'électricité que possèdent les molécules naturellement bipolaires de l'organisme vivant, que se fait la communication entre les centres nerveux et les différentes parties du corps; tandis que, ce principe étant admis, on conçoit la perturbation que doit apporter dans l'exercice régulier de cette communication une électricité extérieure aussi forte que celle de la foudre.

la mort dans les individus chez lesquels l'action de la foudre a été directe et a par conséquent détruit pour toujours, dans toutes les parties de leur corps, l'arrangement déterminé par l'influence de la force vitale, pour faire prédominer celui qui ne provient que de l'exercice des forces électriques, ce qui entraîne nécessairement et d'une manière immédiate la formation de nouveaux composés et par conséquent la décomposition. Il n'en est plus de même pour les individus chez lesquels l'action mortelle de la foudre n'a été qu'indirecte et qui ont succombé, soit à la lésion d'un organe essentiel, soit à une asphyxie, comme cela peut avoir lieu par la contraction des muscles respirateurs quand la décharge électrique se porte principalement sur ces organes. Dans ces cas, en effet, la putréfaction arrive beaucoup moins vite et est précédée de la rigidité cadavérique qui ne se montre probablement qu'un instant dans le cas précédent. Rien ne semble mieux prouver que les faits dont nous venons de parler, l'exactitude de la théorie que nous avons donnée sur la cause physique et immédiate de la décomposition animale qui suit la mort, décomposition qui n'est autre chose que la conséquence de l'exercice des forces physiques et en particulier électriques, quand les particules qui en sont douées ne sont plus sous l'influence de la force vitale [1].

L'électricité atmosphérique n'agit pas sur l'homme uniquement par la foudre ; il suffit simplement que le temps soit orageux et l'atmosphère chargée d'électricité pour qu'il en résulte un effet sur l'organisme. Les individus sains et bien portants

[1] Un travail tout récent de M. Brown-Séquard (*Compte rendu de l'Académie des Sciences*, du 5 octobre 1857) vient tout à fait à l'appui de notre manière de voir, en montrant que les contractions musculaires répétées amènent plus promptement la mort complète d'un membre, c'est-à-dire la disparition de l'irritabilité musculaire, l'apparition et la disparition de la rigidité cadavérique, et finalement le développement de la putréfaction. Et en effet tout ce qui donne aux particules des muscles une position forcée, différente de celle qu'elles affectent naturellement sous l'action de la force vitale, tend à détruire l'irritabilité musculaire, qui est tout à fait indépendante de l'action nerveuse et qui est inhérente à la vitalité du muscle, et à faciliter par conséquent la décomposition, ou ce qui revient au même, la putréfaction.

ressentent un malaise, une agitation, une pesanteur difficile à exprimer; leur système musculaire est plus paresseux; les individus atteints de rhumatisme sentent se renouveler leurs douleurs; les névralgies augmentent d'intensité ou leurs accès reparaissent. En général, les malades atteints d'une affection chronique ou aiguë éprouvent, à l'instant d'un orage, une aggravation des principaux accidents; ils sont plus fatigués, plus agités, et leur état fébrile augmente. Il est bien probable que ces différents effets tiennent à l'écoulement d'électricité qui se fait à travers le corps pendant les temps orageux, écoulement qui, ayant lieu à travers tout le corps, à travers les nerfs aussi bien qu'à travers les muscles, trouble l'équilibre qui existe dans l'état normal et par conséquent doit activer ou contrarier certaines fonctions dépendantes de l'influence nerveuse.

Un effet indirect de l'électricité atmosphérique sur l'organisme est la production de l'ozone en plus ou moins grande proportion dans l'atmosphère et l'influence qui en résulte sur l'économie animale. On a assimilé l'effet de l'ozone à celui du chlore; par conséquent, c'est surtout sur les organes respiratoires que l'oxygène à l'état ozoné agirait; d'où l'on a conclu que la présence de l'ozone dans l'atmosphère pouvait être liée avec certaines affections catarrhales épidémiques, telles que la *grippe*. D'un autre côté il paraîtrait, d'après les recherches de quelques médecins, soit en Europe, soit aux États-Unis, que l'ozone aurait la propriété d'exercer une action délétère sur les miasmes et que sa présence dans l'air exercerait par là une influence heureuse sur certaines épidémies. M. Gaillard, médecin à Charlestown aux États-Unis, et M. Wolf, à Berne en Suisse, ont tous les deux étudié cette question sous des points de vue différents et ont également constaté l'influence très-prononcée de l'ozone, dont la présence dans l'air ne peut être due qu'à l'électricité atmosphérique, et non, comme on l'a cru à tort, à la végétation.

M. le docteur Boeckel, de Strasbourg, a fait dans cette ville des observations régulières ozonométriques en employant, comme M. Wolf, l'ozonomètre de Schœnbein, savoir, des bandes de papier recouvertes d'une solution d'iodure de potassium dans l'a-

midon. On expose ces bandes pendant un temps assez long (douze heures) à l'air atmosphérique, puis on les plonge dans de l'eau pure pour les comparer à une échelle passant du blanc, qui est le 0° de la division, au violet obscur, qui est de 10°. Voici un tableau curieux d'observations faites comparativement à Berne par M. Wolf, et à Strasbourg par M. Boeckel. En général, la réaction ozonométrique est plus faible à Strasbourg qu'à Berne, et à côté de la réaction observée, on trouve pour Strasbourg la réaction calculée par la comparaison des moyennes de l'année de Strasbourg avec celles de Berne; les observations ont été faites en 1854.

	BERNE.	STRASBOURG.	
		Observé.	Calculé.
Du 21 juin au 16 juillet.	9,92	7,88	7,54
Du 17 juillet au 12 août.	3,31	2,48	4,04
Du 13 août au 4 septembre. . . .	5,74	2,30	4,36
Du 5 septembre au 30 septembre. . .	5	3,12	3,80
Du 1er octobre au 25 octobre. . .	7,20	6,52	5,47

On remarquera que pendant la seconde et la troisième période les réactions de l'ozone ont présenté à Strasbourg une faiblesse exceptionnelle qui justifie l'hypothèse du docteur Boeckel, de la liaison qui existe entre la présence du choléra et la diminution de la quantité de l'ozone dans l'atmosphère, car ces deux périodes sont celles pendant lesquelles le choléra a sévi le plus fortement à Strasbourg. Dans la quatrième période le choléra avait cessé à Strasbourg et sévissait à Arau ; aussi la réaction s'est trouvée légèrement plus faible à Berne, qui est très-rapproché d'Arau, qu'à Strasbourg ; puis dans la cinquième période, où les dispositions au choléra ont disparu à Berne comme à Strasbourg, la réaction ozonométrique a repris à Berne sa supériorité. On a pu constater encore que le minimum a eu lieu à Berne pour les réactions de l'ozone, en même temps que le choléra avait à Arau son maximum d'intensité, c'est-à-dire du 12 au 16 septembre.

Nous n'insisterons pas sur le rapprochement que nous venons de signaler, vu qu'il aurait besoin d'un plus grand nombre d'observations pour recevoir une confirmation positive. Nous nous bornerons à remarquer que l'influence évidente en tout cas de l'o-

zone sur l'organisme, est attribuée, suivant les uns à une action indirecte de cet agent chimique qui détruirait les miasmes, comme le fait le chlore, et suivant les autres à une action directe qui déterminerait certaines dispositions maladives, soit en augmentant, soit en diminuant d'intensité. Quoi qu'il en soit, le sujet est intéressant et montre sous combien de formes diverses, les unes indirectes, les autres directes, l'électricité atmosphérique peut agir sur la vie animale.

Agit-elle également sur la vie végétale? Depuis l'abbé Bertholon qui a consacré en 1783 un ouvrage entier à l'action sur les végétaux, de l'électricité aussi bien atmosphérique qu'artificielle, jusqu'aux tentatives faites il y dix à douze ans en Angleterre sous le nom d'électro-culture par M. Forster et M. Solly, pour activer la végétation en soutirant, en vue de l'amener dans le sol au moyen de tiges métalliques, l'électricité atmosphérique, la question est restée indécise. On a prétendu que les pluies d'orage avaient une vertu fertilisante que n'avaient pas les pluies ordinaires; on a cru trouver que la germination et même la végétation étaient activées dans le voisinage des conducteurs de paratonnerres implantés dans le sol. Mais, d'un autre côté, des expériences comparatives faites sur des pièces de terrain placées dans des conditions autant que possible exactement semblables, les unes exposées à l'action de l'électricité atmosphérique, les autres soustraites à cette action, n'ont pas donné des résultats bien décisifs; ce qui tient à ce que, en supposant que l'électricité ait une influence, il y a tant d'autres causes qui en ont aussi, telles que la température, la lumière solaire, indépendamment de la nature du sol qui est rarement identique dans deux places différentes, qu'il est bien difficile de discerner la part qui peut être assignée à l'électricité atmosphérique. Toutefois, sans nous exagérer cette part, ne se pourrait-il pas cependant que les végétaux fussent l'un des canaux par lesquels s'opère la neutralisation régulière et constante de l'électricité négative dont le globe terrestre est constamment chargé, avec la positive que les vapeurs de la mer apportent dans l'atmosphère. Or, cette neutralisation qui aurait lieu à travers les parties humides des plantes devait y exercer une action chimique, en amenant l'oxygène et

les principes acides dans la partie du végétal en contact avec l'air qui servirait d'électrode[1], et l'hydrogène ainsi que les principes alcalins dans la partie extrême des racines ou plutôt dans le sol qui les touche. Mais nous abordons ici les questions les plus délicates de la physiologie végétale; malgré l'intérêt qu'elles présentent, nous ne pourrions les traiter sans dépasser les limites qui nous sont imposées; nous devons nous borner à les signaler comme pouvant être l'objet de recherches intéressantes.

[1] Faraday a montré par plusieurs expériences que l'air peut servir d'électrode dans les décompositions électro-chimiques, opérées par les décharges de l'électricité ordinaire (t. II, p. 386 et 387).

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre[1].

Galvani, Volta, Humboldt, Nobili, Matteucci, Marianini, Dubois-Reymond. — Voyez, pour l'indication de leurs travaux sur l'électricité physiologique, t. II, p. 455, et t. III, p. 88.

Marianini. — Cas de paralysie. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LIV, p. 366.

Nobili. — Cas de tétanos. — *Idem.* T. XLIV, p. 60.

Matteucci. — *Idem.* — *Bibl. univ.* T. XV (1388), p. 188. — Phénomènes de la contraction musculaire. — *Ann. de ch. et de phys.* (*N. S.*). T. XLVII, p. 129.

Helmholtz. — Vitesse de propagation de l'action nerveuse. — *Ann. de ch. et de phys.* (*N. S.*). T. XLIII, p. 367.

A.-J. Duval. — Coup d'œil historique sur les applications de l'électricité à la médecine. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ*). T. XLII, p. 5.

Masson. — Effets physiologiques des courants induits. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXVI, p. 26.

Duchenne de Boulogne, (*le docteur*). — De l'électrisation localisée et de son application à la physiologie, à la pathologie et à la thérapeutique, Paris, 1855. 1 fort vol. in-8. — Plusieurs Mémoires dans les *Archives de médecine*, et le *Bulletin général de thérapeutique.*

A. Becquerel, (le docteur). — Application de l'électricité à la thérapeutique, 1 vol. in-8, 1857.

Bouvier (le docteur). — Rapport sur l'électricité médicale à l'Académie de médecine (*Bulletin de l'Académie de médecine*, Paris, 1856, t. XXI, p. 650 et suiv.).

Remak. — Action physiologique et thérapeutique des courants. — *Compte rendu de l'Académie des Sciences.* T. XLIII, p. 603 et 655.

[1] Le nombre des Mémoires dans lesquels sont traitées les applications de l'électricité à la physiologie, et en particulier à la thérapeutique, est si considérable, que nous nous bornons à indiquer les plus importants et les plus récents, renvoyant pour les autres aux Traités spéciaux sur la matière, dont nous donnons également l'indication.

Jacubowitsch. — Histologie du système nerveux. — *Compte rendu de l'Académie des Sciences.* T. XLV, p. 29.

Prevost et Dumas. — Traitement des calculs par la pile. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXIII, p. 202 et 334.

Bonnet. — *Idem.* — *Bibl. univ.* T. LVIII (1835), p. 391.

Bence-Jones. Idem. — *Phil. trans.*, 1853.

Poey et Vergnès. — Extraction par la pile de métaux dans l'organisme. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVIII, p. 208.

Petrequin. — Guérison des anévrismes par l'électro-puncture. — *Arch. de l'élect.* T. V, p. 485.

Middeldorpf. — Galvano-caustique. — *Compte rendu de l'Académie des Sciences.* T. XLIII, p. 678.

Philippeaux. — *Idem.* — *Traité pratique de la cautérisation*, 1 vol. in-8, chez J.-B. Baillière, 1856.

Jules Regnauld. — *Idem.* — *Idem.*

Boudin. — Histoire physique et médicale de la foudre et de ses effets sur l'homme (*Annales d'hygiène publique*, 1854, 1855, t. II, p. 395; t. III, p. 241; t. IV, p. 241). — *Traité de géographie et de statistique médicales et des maladies endémiques.* Paris, 1857, 2 vol. in-8, t. I, p. 455.

Wolff. — Influence physiologique de l'ozone, brochure in-8, Berne, 1855.

Gaillard. — *Idem*, Charlestown, 1856, brochure in-8.

Bertholon. — *Electricité des végétaux*, 1783, 1 vol. in-8.

Walker. — Électro-culture. — *Arch. de l'élect.* T. V, p. 535.

Fyfe et Peersall. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. II, p. 292 et 293.

APPENDICE[1].

§ 1. Recherches récentes sur l'induction électrostatique.

Peu de jours avant sa mort, Melloni, dans une lettre adressée à M. Regnault et insérée dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences[2], fit connaître une nouvelle théorie de l'induction électrostatique, fondée sur le principe que l'électricité induite dans la partie la plus rapprochée du corps inducteur, et de nom contraire par conséquent à celui de l'électricité de ce corps, est complétement *dissimulée*, c'est-à-dire sans mobilité et sans tension si ce n'est relativement à l'électricité inductrice, tandis que l'électricité libre est douée de ces propriétés. Il généralisait ainsi le principe qu'on avait plus ou moins admis dans la théorie du condensateur, et il expliquait la divergence des deux pendules placés à chacune des extrémités d'un cylindre métallique isolé rapproché d'un corps électrisé, en attribuant la divergence de celui des pendules voisin du corps électrisé à l'attraction exercée par l'électricité de ce corps, et non à l'action de l'électricité induite qui, suivant lui, étant toute dissimulée, ne pouvait produire un semblable effet. M. Riess a heureusement modifié cette expérience, pour montrer que l'explication de Melloni ne saurait être admise. Il place au-dessus et très-près d'une sphère électrisée positive-

[1] Nous avons résumé sous le titre d'*Appendice*, à la fin du troisième et dernier volume de ce Traité, quelques additions aux matières traitées dans les trois volumes, qui ont pour objet de compléter les sujets sur lesquels, soit par omission, soit par l'effet d'une publication postérieure à la nôtre, nous avions laissé quelques lacunes. Nous n'avons pas la prétention de les avoir toutes comblées; mais du moins nous avons l'espoir d'avoir indiqué les points les plus importants, parmi ceux que des travaux récents ont signalés à l'attention des physiciens.

[2] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XXXIX, p. 177.

ment un conducteur isolé, cylindrique et vertical, portant vers ses extrémités de petits pendules de moelle de sureau. Les deux pendules divergent, celui d'en bas plus fortement que celui d'en haut, sans qu'on puisse attribuer sa divergence à l'action de l'électricité de la sphère, car cette action ne peut être évidemment qu'une force verticale, tandis que celle qui fait diverger le pendule est horizontale; il est facile d'ailleurs de constater que les deux pendules ont une électricité contraire. On peut s'assurer également, en touchant la tige induite avec un corps conducteur isolé de petite dimension, que celle des électricités qu'on dit être dissimulée n'a pas perdu la propriété de passer d'un conducteur sur un autre.

S'il n'y a pas d'électricité dissimulée dans l'expérience par laquelle on démontre la décomposition de l'électricité naturelle d'un corps conducteur isolé par l'influence à distance d'un corps électrisé, il ne doit pas y en avoir davantage dans les appareils tels que le condensateur et la bouteille de Leyde, au moyen desquels on obtient la condensation de l'électricité. Cependant, par une contradiction incroyable, la plupart des traités de physique, qui n'admettent pas d'électricité dissimulée dans le premier cas, en admettent dans le second; et cependant il n'y a d'autres différences entre les deux cas que celles qui tiennent à la forme et à la distance des deux corps, dont l'un est électrisé et l'autre influencé. M. Riess a bien senti que cette contradiction ne pouvait subsister; aussi a-t-il donné une nouvelle théorie du condensateur, qui, ne s'appuyant pas sur l'hypothèse de l'électricité dissimulée, ne constitue plus un cas d'exception aux lois générales de la distribution de l'électricité et aux principes établis par Æpinus, Coulomb et Poisson sur l'équilibre de l'électricité à la surface des corps conducteurs[1]. Mais le problème devient alors difficile et ne comporte plus une solution simple et générale comme dans l'hypothèse de l'électricité dissimulée; c'est en contrôlant au moyen de l'expérience l'exactitude de la formule fondée sur cette hypothèse que M. Riess a réussi à en démontrer le peu de fonde-

[1] *Annales de chimie et de physique* (N. S.), t. XLII, p. 374 et 376.

ment. Une série d'expériences faites avec des condensateurs, dont les plateaux étaient à différentes distances et avaient des surfaces plus ou moins grandes, et dans lesquelles le plateau qui ne recevait pas l'électricité communiquait plus ou moins parfaitement avec le sol, ont démontré que le problème du condensateur est un problème complexe, dépendant de toutes les particularités que peut offrir la disposition des appareils, en un mot du même genre que tous les problèmes relatifs à la distribution de l'électricité. On voit qu'il n'y a pas de force condensante dépendant uniquement de la distance des plateaux, ou simultanément de leur distance et de leur superficie. Il n'y a donc pas lieu de chercher une expression simple de cette force, et la vérification de la formule $\frac{1}{1-m^2}$[1] devient superflue. Néanmoins M. Riess s'est occupé de rechercher un moyen exact et commode de déterminer la quantité m, c'est-à-dire le rapport de deux quantités absolues d'électricité qui s'accumulent sur le plateau du condensateur. Il a renoncé au procédé qui consiste à séparer les deux plateaux, et à mesurer les densités électriques en des points semblablement situés sur ces deux plateaux, à cause des difficultés qui résultent de la nécessité de faire très-rapidement la comparaison de deux électricités de nature différente. Il a disposé l'expérience de manière à n'avoir à comparer que des électricités de même espèce. Pour cela il a pris la densité de l'électricité en un point du plateau collecteur avant de l'approcher du plateau condensateur, puis il l'a prise encore après avoir rapproché les deux plateaux l'un de l'autre, supprimé la communication du plateau condensateur avec le sol, et réuni les deux plateaux par un arc métallique isolé, de manière à ce qu'ils ne possédassent plus que l'excès de l'électricité du premier sur celle du second ; il a recommencé ensuite l'expérience en maintenant toujours isolé et sans communication avec le sol le plateau condensateur, de façon qu'il y avait sur ce plateau des quantités égales des deux électricités contraires. Ces dernières expériences lui ont fourni les données

[1] Voyez tome I, page 583.

nécessaires pour calculer, au moyen de formules très-simples, la valeur du rapport cherché.

Le principe des électricités dissimulées, généralisé avec raison, s'il est vrai, par Melloni, a trouvé des défenseurs habiles, parmi lesquels l'un des plus ardents et des plus ingénieux est, sans aucun doute, M. Volpicelli. Le savant physicien italien conclut de plusieurs expériences, que nous ne pouvons reproduire ici [1], que l'électricité induite n'a de tension que relativement à l'électricité inductrice, et que par conséquent, pendant l'induction, elle ne peut ni faire diverger les électromètres, ni produire une induction sur l'électricité libre de signe contraire, ni se neutraliser avec elle, que par conséquent cette électricité libre doit se distribuer sur tout le corps induit, comme si celle qui est dissimulée n'existait pas, en obéissant aux lois ordinaires de la distribution jointes à l'influence répulsive exercée par l'électricité inductrice qui est de même nature. Parmi les expériences de M. Volpicelli, nous citerons les deux suivantes qui nous paraissent les plus simples et les plus concluantes en faveur de sa thèse, surtout la seconde. La première consiste à disposer vers l'extrémité du cylindre métallique isolé et induit, le bout d'un fil conducteur très-mince, isolé et dirigé perpendiculairement à l'axe du cylindre, dont l'autre extrémité est reliée à un électroscope. Au moyen d'un fil de soie, on peut mettre le premier bout du fil facilement en contact avec la surface du cylindre induit dont il n'est éloigné que d'un demi-millimètre. C'est avec un gros cylindre de cire d'Espagne électrisé par frottement, qu'on produit l'induction sur le cylindre et sur le fil en les mettant tous les deux en communication avec le sol; puis on interrompt cette communication de manière à les isoler tous les deux, et on met aussitôt le bout du fil métallique en contact avec le cylindre à l'aide du fil de soie; l'électroscope ne donne aucun signe d'électricité, d'où M. Volpicelli conclut que l'électricité induite n'a pas de tension. On répète la même

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLI, p. 553, t. XLIII, p. 719, et t. XLIV, p. 917 — *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), années 1856 et 1857.

expérience en mettant le fil conducteur, et non le cylindre, en communication avec le sol pendant l'induction; puis, après l'avoir isolé, on met son extrémité en contact avec le cylindre; à l'instant l'électroscope accuse de l'électricité libre semblable à celle de l'inducteur, et cela quel que soit le point de la surface du cylindre induit qui touche le bout du fil conducteur; seulement il y a une moindre quantité d'électricité dans l'extrémité du cylindre la plus voisine du corps inducteur que dans celle qui en est la plus éloignée. On peut faire à cette expérience l'objection que le fil conducteur, qu'on fait communiquer avec le cylindre induit, ne peut pas être considéré comme un simple véhicule de l'électricité, mais que, dès qu'il est en contact avec ce cylindre, il constitue avec lui un nouveau système de conducteurs, dans lequel l'électricité produite par l'induction de la cire électrisée doit affecter une nouvelle distribution à laquelle est due la présence, à l'extrémité du fil en contact avec l'électroscope, de l'électricité du même nom que celle de l'inducteur. La seconde expérience de M. Volpicelli, que nous tenons encore à citer, est à l'abri de cette objection; elle consiste à toucher les différents points de la surface du cylindre induit avec un plan d'épreuve assez petit pour qu'il puisse se confondre avec l'élément de surface sur lequel on l'applique; un disque de cuivre d'un demi-centimètre de diamètre et d'un quart de millimètre d'épaisseur, fixé avec de la cire d'Espagne à l'extrémité d'un tube de verre très-mince, remplit cette condition. Après avoir vérifié qu'il n'y a pas transport sensible d'électricité à travers l'air, entre les corps induit et inducteur, vérification toujours nécessaire, on touche avec le petit plan d'épreuve l'extrémite du cylindre induit la plus voisine de l'inducteur, et on trouve l'électricité semblable à celle de l'inducteur; on en trouve dans tous les points de la surface du cylindre induit d'un bout à l'autre; d'où l'on conclut que l'électricité induite de nom contraire à celle de l'inducteur n'a pas de tension, et que celle de même nom, qui est libre, est distribuée sur toute la surface du cylindre induit, comme s'il ne possédait point d'autre électricité. Si le plan d'épreuve est de grande dimension, il se charge alors d'électri-

cité de nom contraire à celle de l'inducteur, ce qui tient à ce qu'il joue lui-même le rôle d'un corps induit qui garde toujours, après avoir été soustrait à l'induction, une portion de l'électricité induite, celle de même nom que l'électricité inductrice s'étant en partie dissipée dans l'air.

Malgré tout ce que cette dernière expérience présente de spécieux en faveur de la thèse que soutient M. Volpicelli, nous avons de la peine, nous en convenons, à comprendre cet état de l'électricité tel qu'elle peut perdre ses propriétés ordinaires, sauf à l'égard de l'électricité des corps inducteurs, et il nous en coûte de renoncer aux lois si simples et si générales de l'équilibre des forces électriques, telles qu'elles ont été établies par Poisson. Aussi croyons-nous que, tout en prenant en sérieuse considération les expériences si remarquables de M. Volpicelli, il faudrait les varier encore en les étudiant de plus près, en vue de chercher si elles sont réellement inconciliables avec l'ancienne théorie ; celle du plan d'épreuve en particulier mériterait un pareil examen. C'est une recherche que nous nous permettons de recommander à l'attention des physiciens, et avant tout à celle de M. Volpicelli lui-même qui a ouvert ce nouveau champ d'investigations.

Nous ne pouvons pas passer sous silence, à l'occasion de l'induction électrostatique, la discussion remarquable qui s'est élevée entre MM. Riess et Faraday sur le rôle des diélectriques dans cette induction [1]. M. Faraday, comme nous l'avons dit, n'admettant pas d'action à distance, estime que l'induction s'opère par l'intermédiaire des particules isolantes qui séparent le corps induit du corps inducteur, et en particulier par l'intermédiaire des particules d'une plaque de gomme laque, si c'est une semblable plaque qui est interposée. Il résulte de là des différences entre les divers corps isolants, soit diélectriques, quant à leur faculté de transmettre l'induction. Suivant M. Riess, toute plaque intermédiaire entre un corps inducteur et un corps induit, qu'elle soit d'une substance conductrice ou non, est immédiatement chargée par l'induction, des deux électricités qui

[1] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXI, p. 18.

sont disposées d'une certaine manière sur les deux faces de la plaque. La distribution des deux électricités ne peut pas être déterminée d'une manière rigoureuse dans le cas de la plaque non conductrice comme il peut l'être dans le cas de la plaque conductrice; mais il n'en résulte pas qu'il y ait une différence essentielle entre l'action d'un corps conducteur et celle d'un corps isolant, relativement à l'induction électrostatique, quoiqu'il soit bien évident que la manière dont l'induction se produit sur une plaque conductrice et sur une plaque non conductrice ne soit pas la même à tous égards. Les deux savants physiciens invoquent chacun en faveur de leur opinion une expérience dans laquelle un disque de gomme laque placé sous l'influence du conducteur positif d'une machine électrique et exposé sur celle de ses surfaces qui n'est pas tournée du côté du conducteur, à l'action de la flamme d'une lampe à alcool, se trouve électrisée négativement. Mais M. Riess remarque avec raison que cette expérience est très-complexe, le rôle de la flamme d'alcool étant moins simple que ne le suppose M. Faraday, et il parvient à expliquer l'état négatif de la surface exposée à la flamme, qui d'après la théorie de l'induction devrait être positive, sans être obligé de renoncer à cette théorie et d'admettre les idées de M. Faraday. Nous avons déjà remarqué [1] qu'on peut concilier le principe de l'action à distance avec les effets obtenus par M. Faraday sur l'influence des diélectriques, en admettant que ces derniers se polarisent quand ils sont placés entre deux corps chargés d'électricités contraires.

§ 2. Influence des actions mécaniques sur l'aimantation.

Nous avons parlé déjà, mais en très-peu de mots[2], des expériences de M. de Wertheim, sur l'influence de la torsion sur le magnétisme; mais dès lors des expériences de ce savant, d'un grand intérêt, sont venues compléter son travail[3]. On savait

[1] Tome I, page 446

[2] Tome I, page 318.

[3] *Annales de chimie et de physique*, tome L, p. 385.

depuis longtemps que les actions mécaniques modifient l'état magnétique d'une barre de fer placée sous l'influence de la terre ou d'un aimant quelconque. Pour expliquer ces faits, on se bornait à dire que toute action mécanique diminue momentanément la force coercitive d'un aimant et permet ainsi aux molécules qui le composent, soit d'obéir plus complétement aux forces extérieures magnétisantes, soit de revenir à un état plus voisin de l'état d'équilibre ordinaire, lorsque la cause d'aimantation a cessé. C'est en effet ce qui a lieu d'une manière générale; mais parmi les actions mécaniques, il en est une, la torsion, dont les effets sur le magnétisme des aimants sont soumis à des lois particulières. M. Wertheim, dans un mémoire sur les effets magnétiques de la torsion a fait connaître des faits qui établissent, comme nous le verrons, des rapports nouveaux entre cette action mécanique et le magnétisme des aimants sur lesquels on l'exerce.

L'appareil de M. Wertheim est une table horizontale sur laquelle deux mâchoires, dans lesquelles s'encastrent les extrémités de la barre, peuvent se mouvoir le long d'un rail, de manière à laisser entre elles une distance voulue. L'une des mâchoires est fixe et l'autre est centrée sur l'axe d'une grande poulie, à la circonférence de laquelle deux poids équivalents agissant à l'extrémité d'un même diamètre, l'un directement de haut en bas, l'autre de bas en haut à l'aide d'une poulie de renvoi, constituent le couple de torsion; dans la surface antérieure de la roue est encastré un cercle divisé en sixièmes de degrés sexagésimaux et les angles de torsion se mesurent au sixième de minute près au moyen d'un vernier fixe. Avec cet appareil, on peut tordre la barre *dextrorsum* ou *sinistrorsum*, mesurer dans chaque cas les angles des torsions temporaires ou permanentes, la laisser revenir en se détordant, à sa position primitive ou enfin la maintenir sous une torsion temporaire fixe qu'il ne faut pas confondre avec une torsion permanente.

La partie de l'appareil, qui sert à aimanter la barre et à étudier les variations de son magnétisme, se compose de deux hélices dans l'axe desquelles on la place. L'une, inductrice, est formée d'un gros fil et reçoit le courant d'une pile; l'autre, en

fil plus mince, comprend dans son circuit un galvanomètre sensible. Toutes les variations brusques qu'éprouve le magnétisme de la barre font naître des courants d'induction, dont la direction et l'intensité sont mesurées par le galvanomètre. La position de l'hélice induite par rapport à la barre est indifférente; mais il est très-important que la barre aimantée ne présente pas de points conséquents; elle se comporterait alors par rapport au galvanomètre comme deux aimants dirigés en sens inverses et développant par conséquent des courants de sens contraires.

On sait que le fer doux et l'acier sont deux termes extrêmes qui n'existent pas en réalité, c'est-à-dire qu'il n'est pas de fer doux qui ne garde un peu de magnétisme, ni d'acier qui n'en perde quand la cause d'aimantation vient à cesser. M. Wertheim a dû chercher à distinguer, dans les effets de la torsion, la partie qui se rapporte à l'aimantation temporaire de celle qui se rapporte à l'aimantatiou permanente, et pour cela mesurer directement le magnétisme permanent des barreaux par le nombre des oscillations d'une aiguille aimantée.

Dans une première série d'expériences sur des barreaux différant par le degré de dureté du fer, M. Wertheim a établi les faits suivants. L'action mécanique de la torsion ou de la détorsion ne développe pas, à elle seule, le magnétisme; mais, lorsqu'un barreau est placé sous une action magnétique quelconque, les torsions rendent le fer doux capable de fixer d'une manière permanente une quantité de magnétisme beaucoup plus considérable que si son équilibre mécanique n'avait pas été dérangé. Voici maintenant le fait important; dès que le fer a acquis toute l'aimantation temporaire ou permanente qu'il est capable d'acquérir sous l'action d'un aimant donné, toute torsion qu'on exerce sur lui fait diminuer son aimantation totale, tandis que la détorsion correspondante la rétablit [1]. Enfin, si l'on soustrait

[1] En effet, chaque torsion, dans un sens ou dans un autre, développe dans l'hélice induite un courant appelé *négatif* par M. Wertheim, c'est-à-dire résultant d'une désaimantation, et la détorsion correspondante donne un courant égal et de signe contraire.

la barre à l'action magnétique extérieure, les torsions ou détorsions, agissant comme tous les autres ébranlements mécaniques, détruisent promptement l'aimantation temporaire, mais continuent indéfiniment à exercer leur effet sur l'aimantation permanente qui est diminuée par les torsions et rétablie par les détorsions. Les expériences de M. Wertheim, répétées sur des barreaux de diverses espèces, lui ont montré que plus le fer est dur, plus il faut de torsions pour lui faire prendre ou perdre son aimantation temporaire, et quant à l'acier, les torsions accélèrent bien l'établissement de l'équilibre magnétique, mais une fois établi, il ne peut plus être dérangé par la seule torsion, sans l'aide d'une influence magnétique.

Dans cette première série d'expériences, la barre n'était soumise à aucune torsion (*zéro mécanique*) au moment où l'on fermait ou ouvrait le circuit magnétisant, et c'était à partir de cette position que l'on avait appliqué des torsions toujours assez faibles pour pouvoir être considérées comme temporaires. On a vu que le résultat de ces expériences avait été la coïncidence du *maximum* de *l'aimantation* [1] avec la position du zéro mécanique. M. Wertheim a successivement modifié son mode d'expérimentation de la manière suivante.

1° On commence par donner à la barre une torsion temporaire quelconque, puis on l'aimante; en répétant alors les expériences précédentes, on retrouve les mêmes phénomènes, c'est-à-dire que tout se passe comme si l'on n'avait exercé la torsion temporaire qu'après l'aimantation de la barre. Ainsi, dans ce cas, nouvelle coïncidence du maximum d'aimantation avec le zéro mécanique.

2° On imprime à la barre, avant de l'aimanter, une torsion permanente quelconque, et on trouve que cette barre ainsi modifiée mécaniquement ne l'est pas sous le rapport magnétique, et que le maximum de l'aimantation coïncide avec ce nouveau zéro mécanique.

[1] C'est-à-dire de la position de la barre, qui est telle, qu'en la tordant soit à droite, soit à gauche, son magnétisme diminue et redevient ce qu'il était par le fait des détorsions.

3° Pendant que le fer est sous l'action du courant aimantant, on applique à la barre une torsion permanente; on observe alors le déplacement du maximum ou une *rotation du maximum* dans le sens de la torsion permanente; la grandeur de l'angle varie suivant la qualité du fer.

4° Pendant que la barre est sous l'action d'une torsion temporaire, on interrompt le courant aimantant, et cette interruption produit une rotation du maximum dans le sens de la torsion temporaire; l'angle de rotation ne dépasse jamais l'angle de cette torsion, mais il en est d'autant plus rapproché que le fer est plus doux.

En partant de ces faits, M. Wertheim s'est d'abord attaché à montrer que l'hypothèse de la force coercitive ne suffit pas pour les expliquer. L'explication qu'en a donnée M. Matteucci, en attribuant les effets magnétiques de la torsion aux changements de volume qu'elle produit dans les barres, ne peut pas en rendre compte, dans la plupart des cas, d'une manière satisfaisante. M. Wertheim a cherché ensuite à faire rentrer ces faits dans une théorie d'après laquelle le magnétisme serait dû à des vibrations, et où la coïncidence de leurs phases, détruite par la torsion et rétablie par la détorsion correspondante, produirait les divers effets dont nous avons parlé.

Il nous semble que ces effets peuvent facilement s'expliquer dans la théorie que nous avons admise, et qui consiste à partir du principe que les molécules du fer étant naturellement entourées de courants électriques, l'aimantation n'est que le résultat d'une action extérieure soit électro-dynamique ou magnétique, qui oblige ces courants à se disposer d'une manière régulière. Les actions mécaniques, et en particulier la torsion et la détorsion, peuvent faciliter ou contrarier l'action magnétisante de la même manière que le plus ou moins de frottement qu'éprouve un courant mobile dans son mode de suspension empêche plus ou moins ce conducteur d'obéir à l'action d'un courant ou d'un aimant fixe. La variation de conductibilité électrique que détermine l'aimantation dans l'acier et dans le fer, suivant M. Thompson, comme nous le verrons plus loin, est une nouvelle preuve à ajouter à celles que nous avons

données déjà sur le changement moléculaire qui accompagne l'aimantation, changement qui consisterait à rapprocher les particules dans le sens perpendiculaire à la ligne qui joint les pôles magnétiques, et à les éloigner les unes des autres dans la direction de cette ligne.

§ 3. Influence de la température sur le magnétisme.

Nous avons indiqué d'une manière générale, dans la troisième partie de ce Traité [1], que l'élévation de la température diminuait et même finissait, lorsqu'elle était très-considérable, par faire disparaître le magnétisme des barreaux aimantés. Depuis la publication de notre premier volume, deux physiciens distingués, M. Dufour [2] et M. Wiedemann [3] se sont occupés de ce sujet. C'est le résumé de leurs recherches que nous donnons ici.

Pour étudier d'une manière exacte la manière dont se comporte le magnétisme des aimants à une température élevée, M. Dufour a placé un barreau aimanté dans une caisse en cuivre remplie d'huile et chauffée par deux lampes à alcool ; l'intensité magnétique du barreau était mesurée par une aiguille aimantée suspendue librement au-dessus de lui et mise par divers moyens, hors de l'influence calorifique de l'appareil. Il a pu constater ainsi qu'à une température encore bien éloignée du rouge, les aimants ne gardent plus qu'une très-petite fraction de leur force primitive ; chauffés au rouge, ils ne possèdent plus de polarité, mais celle-ci reparaît par le refroidissement. Ce n'est qu'après avoir été chauffé quatre fois jusqu'au rouge vif, qu'un barreau a fini par perdre complétement son magnétisme. L'influence de la trempe a été constatée d'une manière très-nette ; les barreaux d'acier fortement trempés perdent une

[1] Tome I, page 191.

[2] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXI, p. 105, et t. XXXIV, p. 5 et 295.

[3] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXV, p. 59.

proportion moins grande de leur magnétisme, lorsqu'on les porte de 10° à 250° que ceux qui ont éprouvé une trempe plus faible, et ils en recouvrent aussi une moindre proportion quand on les refroidit. En général, lorsqu'on chauffe plusieurs fois un barreau, la variation d'intensité magnétique, correspondant à une même variation de température, diminue d'autant plus rapidement que la trempe du barreau est moins forte, et par des réchauffements répétés et successifs on affaiblit ainsi plus promptement un barreau fortement trempé qu'un autre à trempe plus faible. En résumé, il résulte de cette première série de recherches que la loi des variations de l'intensité magnétique avec la température doit suivre des modifications pour chaque réchauffement d'un même barreau; d'ailleurs, pour une seule et même expérience, elle paraît très-complexe, la variation d'intensité du magnétisme étant plus grande entre 100° et 200° qu'entre 0° et 100° ou au-dessus de 200°.

Dans les formules de correction relatives à l'influence de la température sur le magnétisme des aiguilles aimantées, on admettait implicitement que, si l'élévation de la température produit une diminution d'intensité magnétique, son abaissement doit produire une augmentation. Or, d'après les expériences de M. Dufour, il faut tenir compte de la température absolue à laquelle le barreau a été aimanté, et un changement de température dans un sens comme dans l'autre, à partir de cette limite, produit une diminution de magnétisme, aussi bien par refroidissement que par réchauffement; diminution qui disparaît plus ou moins par le retour à la température primitive d'aimantation. Un assez grand nombre d'expériences semblent confirmer ce fait important qui peut être rapproché du rapport établi par M. Wertheim, entre l'état d'équilibre mécanique d'un barreau qu'on aimante et son maximum d'aimantation.

M. Wiedemann, en répétant les expériences de M. Dufour, a vérifié qu'un abaissement de température au-dessous de celle à laquelle l'aimantation a eu lieu, produit en effet une diminution de magnétisme; mais il a trouvé que, si l'on continue à faire subir au barreau des variations successives de tempéra-

ture, il rentre bientôt dans la loi générale, comme M. Dufour l'a reconnu plus tard lui-même, et que le degré de température à laquelle le barreau a été aimanté n'influe plus sur le sens de la variation de l'intensité magnétique. Ce qui, par contre, demeure vrai d'une manière absolue, c'est le fait constaté par M. Dufour, que les variations du magnétisme d'un barreau aimanté à une température plus élevée que celles auxquelles on l'a aimanté, sont plus faibles qu'elles ne seraient si l'aimantation avait eu lieu à une température plus basse. Il y a plus; les oscillations thermométriques font promptement acquérir au barreau une insensibilité à peu près complète à de faibles variations de température. Sur ce point, M. Wiedemann ne va pas tout à fait aussi loin que M. Dufour, bien qu'il ait trouvé aussi que des barreaux aimantés, à 100° chauffés et refroidis à plusieurs reprises, ne gardaient, sous le rapport de l'influence de la température sur leur magnétisme, qu'une sensibilité bien moindre que les barreaux aimantés à 0° exposés aux mêmes variations de température. Ce dernier fait est d'une importance bien grande dans le choix des aiguilles dont on doit se servir pour les observations de magnétisme terrestre, dans lesquelles on cherche l'état le plus convenable pour diminuer les corrections et les erreurs dues à la température. Voici, à cet égard, les règles à suivre que recommande M. Dufour :

1° Aimanter à une température *supérieure* à celles dans lesquelles les observations seront faites.

2° Faire varier la température de l'aiguille un grand nombre de fois (de 20 à 30), entre la température d'aimantation et la température minimum à laquelle on pourra être exposé.

3° Chercher la correction propre à l'aiguille, *seulement après* lui avoir fait subir les opérations indiquées ; correction qui se déterminera, du reste, comme on le jugera convenable, soit en cherchant le vrai coefficient de variation pour 1 degré de température, soit en déterminant une ou plusieurs constantes empiriques, suivant le genre d'observations qu'on veut entreprendre.

§ 4. Théorie de l'induction électro-dynamique de M. Felici[1].

Dans le chapitre que nous avons consacré à l'induction électro-dynamique, nous avons dit quelques mots des théories proposées par plusieurs physiciens pour l'explication des faits qui s'y rattachent, et en particulier de celles de Weber et de Neumann. Ces théories ont peut-être l'inconvénient de s'appuyer moins sur les faits de l'induction elle-même que sur ses rapports évidents, il est vrai, avec les actions électro-dynamiques; elles sont jusqu'à un certain point l'expression mathématique de la loi de Lenz; en outre, elles n'embrassent que les phénomènes de l'induction produite par le mouvement sans les rattacher à ceux de l'induction par l'ouverture et la fermeture des circuits. M. Felici a fait de l'induction électro-dynamique l'objet de ses nombreuses et intéressantes recherches; il s'est appliqué à rassembler le plus grand nombre possible de faits pouvant donner naissance à une théorie mathématique de l'induction qui se déduisît ainsi de l'expérience seule. La méthode qu'il a suivie est celle qu'Ampère a appliquée à la théorie des actions électro-dynamiques, et l'ensemble de ses recherches, dont nous ne pouvons donner ici qu'un résumé succinct, est destiné, nous le pensons, à jeter du jour sur cette partie encore si peu connue et si peu expliquée de l'électricité dynamique.

M. Felici a commencé par étudier les lois des courants induits produits par l'ouverture et la fermeture d'un circuit voisin. L'appareil dont il a fait usage est un cylindre de bois autour duquel on enroule un fil de cuivre isolé formant un cercle complet, et dont les deux bouts tordus ensemble communiquent avec un galvanomètre : c'est le *circuit induit*. A droite et à gauche, à des distances égales, sont disposés des conducteurs semblables formés par le fil qui joint les pôles d'une pile; ce sont les circuits *inducteurs* dans lesquels on in-

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, t. XXXIV, p. 64.

troduit un rhéotome. En général, la méthode de M. Felici consiste à faire agir simultanément les deux inducteurs, de façon que leurs effets étant contraires, l'absence de courant induit constate leur égalité. Le fait que les conducteurs, à partir du cylindre, sont enroulés ensemble, permet de rapporter les effets étudiés aux cercles seulement.

L'intensité des courants induits est indépendante de la nature des circuits. Il suffit pour cela de remplacer un des anneaux de cuivre par un anneau de zinc, etc., et de constater que l'aiguille du galvanomètre est toujours au 0°.

L'intensité des courants induits est proportionnelle à celle des courants inducteurs. On remplace un des anneaux inducteurs par un anneau formé de n fils égaux; l'action inductrice de ce système est égale à celle de l'autre anneau unique, c'est-à-dire que l'action inductrice de n courants égaux chacun à $\frac{K}{n}$ est égale à celle d'un courant égal à leur somme K. On peut vérifier d'une manière analogue que l'intensité des courants induits est indépendante de la section des fils qui composent les circuits.

M. Felici a pu facilement, au moyen de ce même appareil, étendre au cas des courants induits le théorème des courants sinueux, soit quant au circuit inducteur, soit quant au circuit induit, et, en s'appuyant sur cette généralisation, déterminer la forme générale de la formule algébrique qui exprime la force électromotrice induite dans un élément. Un cas particulier d'équilibre a permis à l'auteur de déterminer l'une des constantes qui y entre; l'autre reste indéterminée, et sa valeur ne peut être obtenue qu'en expérimentant sur des circuits ouverts, seul cas du reste où la partie de la formule dans laquelle elle entre ne disparaisse pas.

Après avoir ainsi exprimé d'une manière générale la force électromotrice des courants induits par l'ouverture et la fermeture des courants inducteurs, l'auteur s'est proposé de rattacher à cette théorie la production des courants induits par le mouvement, et il pense avoir établi le théorème suivant :

Le courant induit développé dans un conducteur par la fer-

meture d'un circuit dans une position A, est égal à la somme des courants induits qui s'y développent en amenant le circuit fermé d'une position suffisamment éloignée à la position A, et plus généralement la somme des courants induits, produits par le mouvement du courant de B en A, est égale à la différence des courants induits développés par la fermeture du circuit successivement dans les deux positions A et B.

Les expériences sur lesquelles repose ce théorème montrent la proportionnalité des quantités dont l'auteur énonce l'égalité, et elles nous paraissent avoir besoin d'être étendues à des cas plus généraux, et peut-être en même temps plus simples. Quoi qu'il en soit, ce théorème admis donne le moyen de calculer les forces électromotrices induites par un mouvement quelconque, et ces formules sont d'accord avec celles de MM. Weber et Neumann.

M. Felici a ensuite abordé le cas des circuits induits ouverts qui donne lieu aux phénomènes connus sous le nom d'induction *unipolaire* ou *axiale*, étudiés déjà par Faraday, puis par MM. Weber et Matteucci. On sait qu'un aimant cylindrique, c'est-à-dire dont le magnétisme est supposé symétriquement distribué tout autour de son axe, peut produire, en tournant autour de cet axe même, des courants induits, mais à la condition que les circuits dans lesquels ils se développent aient une portion en mouvement; en d'autres termes, on trouve exactement ici la réciproque des lois de la rotation d'un courant par un aimant, c'est-à-dire que toutes les fois que l'aimant produirait une action sur le courant, le mouvement du circuit produit un courant. Ce genre d'induction, qui diffère de l'induction ordinaire, en ce qu'on ne voit pas de changement relatif de position entre le circuit et l'aimant, se rattache, quant à ses lois, à l'induction ordinaire par l'expérience suivante que M. Matteucci cite le premier, et qui a été reprise avec plus de rigueur par M. Felici. On a un électro-aimant cylindrique et un disque métallique disposé perpendiculairement à l'axe du cylindre avec son centre sur cet axe. Des deux fils du galvanomètre, l'un communique avec le disque; quant à l'autre, dont la surface doit être recouverte de soie, on en forme une spirale

que l'on dispose de manière qu'il ne s'y développe pas de courant induit, lorsqu'on ferme le circuit qui aimante l'électro-aimant. Si l'on fait maintenant décrire rapidement à l'extrémité mise à nu de ce dernier fil une courbe quelconque sur le disque, en ayant soin que le fil de la spirale se superpose exactement sur la courbe décrite par son extrémité, l'aiguille du galvanomètre reste au 0°. Or, la partie du fil qui, partant d'une position dans laquelle il n'y a pas de courant produit par la fermeture du circuit de l'électro-aimant, va se placer sur le disque, donne lieu à un courant dont l'intensité peut se calculer par la méthode ci-dessus mentionnée; mais, d'un autre côté, le glissement du bout du fil sur le disque en présence de l'aimant produit un courant de sens contraire et, d'après le résultat de l'expérience, on voit que son intensité est la même que celle du premier, et l'on en conclut d'une manière générale que le courant développé par le glissement de l'extrémité du galvanomètre est égal à celui qu'il produirait dans ce même fil placé sur la courbe décrite, par la fermeture du circuit de l'électro-aimant.

Nous n'avons parlé que des recherches de M. Felici sur les circuits filiformes; il a étendu sa théorie aux corps à trois dimensions, en considérant chaque point comme le siége d'une force électro-motrice produisant un courant élémentaire qui se diffuse dans le corps tout entier. M. Felici, en appliquant le calcul au disque tournant dans l'action d'un aimant, est arrivé à des résultats conformes à ceux qu'a signalés M. Matteucci dans son étude spéciale sur ce cas de l'induction.

§ 8. Perfectionnements apportés aux appareils d'induction.

L'induction électro-dynamique est, depuis quelques années, l'objet de nombreuses et intéressantes recherches et, depuis la publication de notre premier volume dans lequel nous avons traité cette branche de l'électricité, on est parvenu à quelques résultats nouveaux dont nous croyons utile de donner ici l'analyse.

Nous avons donné la description complète[1] de l'appareil Ruhmkorff, y compris les perfectionnements apportés par M. Fizeau, consistant en un condensateur dont les deux lames communiquent avec les extrémités du fil inducteur; mais cet appareil, quelque simple qu'en paraisse la théorie, donnait lieu souvent à des difficultés par la manière dont il fonctionne dans certaines circonstances. Les recherches récentes de M. Poggendorff[2] ont fait disparaître ces difficultés, et l'analyse complète de ce qui se passe dans l'appareil Ruhmkorff a de plus l'avantage de montrer d'une manière logique quelle est la meilleure disposition à donner aux diverses pièces qui le composent. Voici les principaux résultats de ce travail.

La construction de l'hélice inductrice ne donne lieu à aucune observation importante. L'hélice induite n'est généralement pas construite d'une manière convenable, en ce sens qu'elle est formée d'un grand nombre de couches superposées et que les deux extrémités du fil se trouvent sur le même bout de l'hélice, ce qui fait que le développement des deux tensions qui y sont contraires et les plus grandes possibles, est nécessairement contrarié. Le meilleur moyen pour diminuer cet inconvénient est de diviser l'hélice en hélices partielles composées chacune d'un nombre impair de couches, ce qui fait que pour chacune les deux extrémités du fil sont aux deux bouts opposés. En outre, M. Poggendorff pense qu'il y aurait avantage à remplacer le vernis solide par un liquide isolant, car une étincelle partant entre deux spires voisines ne détruirait l'isolement que d'une manière temporaire.

L'interrupteur est ordinairement mis en mouvement par le faisceau des fils de fer qui se trouve dans les hélices. Il est avantageux de faire de cet interrupteur une pièce distincte mise en mouvement par un électro-aimant particulier. M. Poggendorff s'est servi de deux interrupteurs différents, dont l'un produisait l'interruption du courant à l'intérieur d'un liquide iso-

[1] Tome I, page 395.

[2] Poggendorff, *Annalen*, t. XCIV, p. 289. *Annales de chimie et de physique*, t. XLIV, p. 375.

lant, et l'autre consistait en un électro-aimant tournant sous l'action d'un aimant en fer à cheval.

Le condensateur, auquel M. Poggendorff donne la préférence, est composé d'une feuille de mica recouverte d'étain sur les deux faces; la différence d'action des condensateurs résultant de la différence de leur surface ne se fait sentir que lorsque l'on se place dans des conditions telles que l'extra-courant dans le fil inducteur soit énergique, c'est-à-dire lorsqu'on fait usage d'un grand nombre d'éléments et d'un fil long et fin.

On peut distinguer dans le mode d'action de l'appareil trois cas différents.

Premier cas. Le circuit induit étant fermé par un conducteur solide ou liquide, il s'y développe des courants de directions alternativement contraires; les courants de directions opposées sont égaux en quantité, mais différents en durée.

Deuxième cas. Les deux extrémités du fil induit sont séparées par de l'air ou par un gaz quelconque. Il arrive alors que le courant induit direct est le seul qui se développe et que l'hélice induite présente deux pôles bien définis. En effet, les extrémités du fil induit étant trop éloignées pour qu'il se développe des étincelles, si l'on approche un électroscope de l'une de ces extrémités, il se charge d'électricité d'une nature constante et dont le signe indique qu'elle résulte du courant induit direct. En outre, en rapprochant les extrémités du fil de façon à produire des étincelles, on constate soit à l'aide du galvanomètre, soit par des procédés électro-chimiques, qu'elles sont dues au courant direct.

Cette différence dans la tension des deux courants induits peut s'expliquer de la manière suivante. Au moment où le circuit se ferme, l'extra-courant qui s'y produit diminue la tension du courant induit inverse; on peut placer le courant induit direct dans des conditions analogues, en faisant passer le courant principal à travers un seul des fils de l'hélice inductrice et en réunissant les deux extrémités du second; le courant induit dans ce second fil réagit alors sur l'induit direct au point de faire disparaître toute étincelle.

M. Poggendorff a fait quelques expériences en plongeant

l'appareil interrupteur dans un liquide et en supprimant le condensateur. Dans des liquides très-conducteurs, on n'obtenait que de faibles étincelles à cause de l'influence de l'extra-courant qui pouvait librement s'etablir. Avec des liquides complétement isolants, les étincelles étaient également faibles, car alors l'appareil, dépourvu de condensateur, fonctionnait comme dans l'air; mais avec des liquides mauvais conducteurs, l'alcool, l'eau distillée, les étincelles étaient très-fortes, le liquide jouant ici le rôle de condensateur.

Ces expériences ont conduit M. Poggendorff à placer l'interrupteur dans de l'air raréfié à une pression de 3 à 4 millimètres de mercure. Les étincelles d'induction sont devenues tout aussi fortes que par l'emploi du condensateur; cependant les étincelles toujours très-fortes qui se produisent dans l'appareil interrupteur altèrent promptement les surfaces métalliques.

Troisième cas. Les extrémités du fil induit sont séparées par un milieu isolant solide ou liquide. Si les extrémités du circuit induit sont des fils de grosseur ordinaire, il ne se produit aucun phénomène; mais s'il est terminé par des plaques d'une certaine étendue séparées par la lame non conductrice, ce condensateur se charge sous l'influence de chaque courant induit et se décharge immédiatement par le fil induit lui-même. On ne peut constater aucune accumulation d'électricité sur les plaques, et l'on entend des bruits qui indiquent le passage continuel de l'électricité dans un sens et dans l'autre entre les plaques et la lame isolante.

Si, en même temps que les extrémités du fil induit communiquent avec un condensateur, on fait communiquer ses deux armatures avec deux boules ou deux pointes rapprochées l'une de l'autre, il passe entre ces deux boules des étincelles plus fortes que les étincelles ordinaires induites, ce qui provient de ce que le condensateur chargé par le courant induit se décharge presque totalement par ces boules à cause de la grande résistance du fil induit.

Le moyen d'augmenter la puissance de l'appareil Ruhmkorff a été aussi l'objet des recherches de M. Foucault, qui a eu l'in-

genieuse idée de faire fonctionner simultanément plusieurs appareils à la fois [1]. En effet l'obstacle qui s'oppose toujours à l'augmentation de l'énergie des étincelles induites est la difficulté d'interrompre instantanément le courant inducteur, difficulté qui croît à mesure que celui-ci devient plus intense et le fil conducteur plus long. Or, si l'on arrive à disposer plusieurs machines inductrices de façon à fonctionner d'une manière parfaitement concordante, l'étincelle de l'extra-courant dans chacune d'elles ne sera pas plus forte que si elle fonctionnait seule, et la puissance du courant induit sera augmentée proportionnellement au nombre des appareils.

M. Foucault a réussi à obtenir la concordance de deux appareils de la manière suivante. Le courant partant du pôle positif de la pile pénètre en se bifurquant dans les bobines inductrices; chacun des courants partiels traverse un interrupteur, puis ils se réunissent pour revenir au pôle négatif; de cette façon les deux machines sont indépendantes l'une de l'autre, mais il suffit de réunir les deux circuits partiels par un conducteur communiquant de part et d'autre avec le fil inducteur entre la bobine et l'interrupteur; l'accord s'établit alors et le système fonctionne avec la puissance d'une machine double. Les étincelles induites sont bruyantes, sinueuses et longues de 16 à 18 millimètres. En opérant avec deux machines il faut, pour maintenir l'isolement du fil induit, établir les communications de telle sorte que les tensions positives et négatives s'accumulent aux extrémités externes et libres du conducteur; en opérant avec un plus nombre d'appareils, cet isolement offrirait d'assez grandes difficultés.

M. Foucault a ajouté un nouveau perfectionnement [2] à l'appareil d'induction de Ruhmkorff en en employant, comme je l'avais déjà fait [3], le mercure comme interrupteur, mais en recouvrant sa surface d'une couche d'alcool pour prévenir son oxydation qui résulterait de la chaleur produite dans l'air par la forte

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLII, p. 215. *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XXXI de la 4e série, p. 243.

[2] *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, t. XLIII, p. 44.

[3] Tome I, pages 298 et 389.

étincelle de l'extra-courant. Une lame élastique en cuivre, recourbée et terminée par une pointe de platine, vient fermer une soixantaine de fois par seconde le circuit inducteur en pénétrant par cette pointe un plus moins grand nombre de fois dans le mercure. Le contact qui s'établit alors n'en est pas moins parfait, malgré sa courte durée; ces contacts se succèdent à des époques régulièrement distribuées dans le temps, ainsi qu'on peut en juger par la persistance du son rendu, qui est le même que celui que rend la série d'étincelles qui éclatent aux extrémités du fil induit. Lorsqu'on a plusieurs machines on les réunit par paire; on supprime les marteaux qu'on remplace par des conducteurs à demeure; on réunit les deux fils inducteurs à la suite l'un de l'autre et l'on introduit dans le circuit l'interrupteur accompagné du condensateur d'extra-courants. Par précaution, chaque machine doit conserver ses fils de décharge écartés à distance normale; elles conservent aussi chacune leurs commutateurs qui servent à diriger respectivement les deux parties du courant en sens tels que des tensions de signes contraires s'accumulent aux extrémités internes des deux fils induits; ceux-ci enfin étant mis en communication, les bouts extérieurs qui restent libres, deviennent les deux pôles du système et donnent des étincelles à la distance de 30 à 35 millimètres pour deux appareils associés de manière à former une paire. Quand on veut placer plus de deux machines sous la conduite de l'interrupteur à mercure, il devient nécessaire d'isoler avec un soin tout particulier ces appareils surnuméraires, c'est-à-dire d'établir dans ces appareils un isolement absolu entre le fil inducteur de la surface intérieure de l'hélice induite; cet isolement s'obtient d'une manière complète en glissant un tube de verre dans l'espace annulaire qui sépare les deux hélices concentriques. A partir du moment où, par les soins de M. Ruhmkorff, cette condition a été remplie, quatre machines réunies ont donné les effets de tension qu'on en pouvait attendre, et le flux des étincelles s'est élancé à la distance de 7 à 8 centimètres. Il n'est pas nécessaire d'insister sur les effets remarquables qu'on peut produire au moyen d'un appareil aussi puissant. Le passage de ces étincelles, déjà si longues, à travers la flamme

d'une lampe à alcool, permet d'éloigner encore plus les électrodes de manière à avoir des étincelles bien plus longues encore et qui en se déchargeant à travers la vapeur d'alcool, rendent un son tout à fait particulier semblable à celui d'une trompette. L'emploi du condensateur d'induction communique aux étincelles un pouvoir éclairant considérable.

Nous ne devons pas oublier de rappeler, en terminant ce paragraphe, que si c'est M. Fizeau qui a eu l'idée de faire communiquer les deux extrémités du fil inducteur avec les deux armatures d'un condensateur, c'est à M. Grove qu'on doit le perfectionnement qui consiste à mettre les deux extrémités du fil induit également en communication avec les deux armatures d'un condensateur tel qu'une bouteille de Leyde par exemple; il en résulte, comme nous l'avons vu, un accroissement considérable dans la puissance des étincelles données par le fil induit. Ce phénomène est d'autant plus remarquable qu'on avait essayé souvent, mais en vain, de charger une batterie électrique par le contact de ses deux armatures avec les deux extrémités d'un fil induit; mais on n'avait jamais obtenu que des effets très-faibles, l'électricité communiquée par le courant induit à la batterie se déchargeant à travers le fil induit lui-même. Ici la décharge a lieu, du moins en grande partie, en traversant sous forme d'étincelle la couche d'air qui sépare les deux pointes métalliques voisines l'une de l'autre et communiquant avec les deux armatures; si la décharge ne se fait pas, du moins entièrement, à travers le fil induit, c'est que ce fil est encore soumis à des actions inductrices qui s'opposent à ce qu'il serve au retour de la décharge [1].

§ 6. Nouvelles recherches sur la polarité diamagnétique et sur le diamagnétisme en général.

Dans la théorie que nous avons donnée du diamagnétisme, dans la troisième partie de ce Traité [2], nous sommes arrivés, en

[1] Voyez *Philosophicale magazine*, t. IX, p. 1 (janvier 1855), et *Annales de chimie et de physique* (*N. S.*), t. XLIII, p. 379.

[2] Tome I, p. 568 et suiv.

nous basant sur les faits, à admettre l'existence d'une polarité diamagnétique. Les recherches qui ont été faites depuis lors viennent confirmer cette conclusion que nous avions tirée principalement des expériences de Weber.

Nous avions remarqué qu'un des principaux arguments en faveur de l'hypothèse du développement d'une polarité spéciale dans les corps diamagnétiques, était que la répulsion exercée par un électro-aimant ou un aimant sur ces corps, varie proportionnellement au carré de l'intensité du magnétisme, ce qui prouve, comme je l'avais fait observer, que le corps diamagnétique ne joue pas un rôle purement passif dans le phénomène, mais qu'il y a sa part aussi bien que le corps aimanté, et par conséquent qu'il éprouve une induction analogue, quoique non semblable, à celle qu'éprouve un corps magnétique, dans des circonstances pareilles. La loi que nous venons de rappeler, découverte par M. E. Becquerel et confirmée par M. Tyndall, vient de recevoir une nouvelle confirmation de M. Reich, qui s'est servi dans ce but de la grande balance de torsion au moyen de laquelle il avait mesuré la densité moyenne de la terre [1]. Il a suspendu à l'extrémité du levier horizontal de cette balance une boule de bismuth, et il en a approché tantôt un barreau aimanté, tantôt un électro-aimant. L'intensité des barreaux aimantés était mesurée par l'action qu'ils exerçaient sur une petite aiguille placée à une grande distance; l'intensité de l'électro-aimant était regardée comme proportionnelle à celle du courant voltaïque, et l'intensité de la répulsion était mesurée par le déplacement du bras de levier de la balance. Les répulsions observées ont varié à peu près comme le carré de l'intensité du magnétisme, mais sans suivre exactement cette loi; différence qui peut s'expliquer, comme le remarque M. Reich, par la variation de la distance entre la boule de bismuth et l'aimant, qui résulte du mouvement même de la balance.

M. Tyndall, à l'appui des conclusions déjà tirées des expériences de M. Reich, avait montré qu'un corps diamagnétique

[1] *Archives des sciences physiques (B. univ.)*, t. XXXI, p. 337.

(un barreau de bismuth) étant mobile et suspendu dans l'intérieur d'une puissante hélice magnétisante, on voyait, lorsqu'on approchait de chacune des extrémités de ce corps le pôle d'un barreau aimanté, ces deux extrémités manifester des propriétés exactement opposées à celles qu'auraient manifestées les extrémités d'un barreau de fer doux placé dans les mêmes conditions. On pouvait objecter à M. Tyndall que le mouvement du bismuth placé dans l'intérieur de l'hélice magnétisante n'était pas dû à une action répulsive de l'aimant sur un pôle de même nom créé dans le morceau de bismuth, mais à un changement dans la direction des forces qui constituent le *champ magnétique*, apporté par la présence de l'aimant. On pouvait lui objecter encore, comme l'ont fait MM. Matteucci et Feitzlich, que l'action de l'aimant sur le corps diamagnétique pouvait être due à la production de courants induits, ainsi que Faraday l'a démontré dans une série d'expériences [1], que, pour éviter la production de ces courants et prouver ainsi que l'effet observé tient bien à la polarité diamagnétique, il faudrait employer, au lieu de corps diamagnétiques conducteurs, des corps diamagnétiques isolants, ou réduits, soit en poudre, soit en petits fragments, afin d'empêcher le développement de courants induits. Pour dissiper tous les doutes et répondre à toutes les objections, M. Tyndall a repris la question dans son entier, et il a réussi, au moyen de nombreuses expériences faites avec le plus grand soin, d'après un système tout différent de celui qu'il avait adopté dans ses premières recherches, à confirmer d'une manière qui nous paraît sans réplique l'existence de la polarité diamagnétique, que nous avions déjà admise [2].

L'appareil que M. Tyndall a employé a été construit par M. Leyser, de Leipsick, d'après les directions de M. Weber, qui a introduit d'heureuses modifications à l'appareil dont il s'était primitivement servi. Il surpasse en exactitude et en sensibilité tous ceux du même genre dont on a fait usage jusqu'à présent. Cet appareil se compose essentiellement de deux hé-

[1] Voyez tome I, page 476.

[2] *Archives des sciences physiques*, (*B. univ.*), t. XXXII, p. 89.

lices magnétisantes HE et H'E' que le courant traverse dans le même sens, et dans l'intérieur desquelles se trouvent deux barreaux de la substance à éprouver, agissant sur un système astatique de deux barreaux aimantés dont la projection verticale est représentée en N S (fig. 439), la projection horizontale en S N et N'S' (fig. 440). Les hélices ont 482 millimètres de hauteur, 20^{mm},3 de diamètre intérieur, 33 millimètres de diamètre extérieur, et leurs axes se trouvent à 101 millimètres de distance l'un de l'autre. Le fil de cuivre recouvert de soie qui les constitue est enroulé sur deux tubes de cuivre dont les extrémités supérieures G et G' dépassent de quelques centimètres les extrémités supérieures des hélices. Les barreaux diamagnétiques *mn* et *op* sont fixés à une corde sans fin *ss'* qui passe sur les deux poulies W et W', de manière qu'on peut à volonté les placer tous les deux à la hauteur du milieu des hélices, ou les déplacer en sens inverse, de quantités égales à partir de cette position. Le système astatique se compose de deux barreaux aimantés égaux S N et S' N' (fig. 440), situés dans un même plan horizontal et réunis par une tige transversale en cuivre P, suspendue elle-même par un faisceau de fils de soie sans torsion au support R *t* (fig. 439). Les deux barreaux sont placés à l'intérieur d'une boîte en cuivre rouge *a d a' d'* qui sert à arrêter leurs oscillations; un miroir, représenté par un cercle noir sur la figure, est invariablement lié au système, et l'observation de l'image d'une règle divisée, réfléchie par le miroir, permet d'en apprécier les plus petits déplacements angulaires.

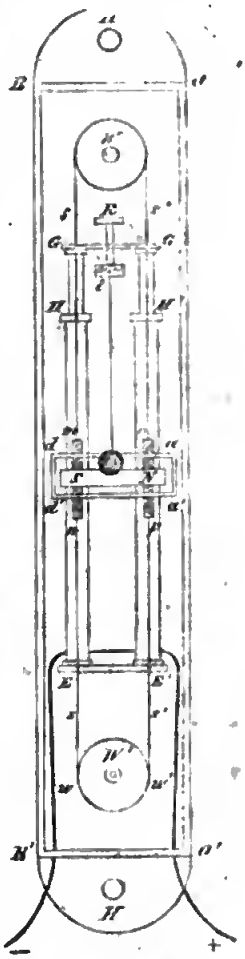


Fig. 439.

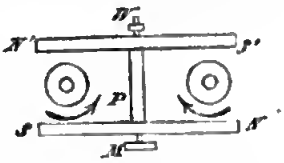


Fig. 440.

Par suite de la disposition de l'appareil, si les deux hélices et les deux barreaux aimantés étaient parfaitement identiques, et si les deux barreaux se trouvaient exactement à la hauteur du milieu des hélices, les actions des hélices sur les barreaux se feraient rigoureusement équilibre. Il n'en est jamais ainsi, et lorsque, après avoir bien ajusté l'appareil, sans introduire de barreaux diamagnétiques dans l'axe des hélices, on fait passer le courant, on observe toujours une légère déviation du système astatique. On a soin de la détruire par l'action d'un circuit auxiliaire placé à quelque distance, et l'on n'introduit les barreaux diamagnétiques que lorsque le passage ou l'interruption du courant ne détermine plus de déviation appréciable. Si les barreaux diamagnétiques ont la position indiquée sur la figure, c'est-à-dire si leurs milieux sont exactement à la hauteur des axes des aimants, l'action des barreaux sur les aimants est nulle ; mais si, par le mouvement des poulies W et W', on amène les extrémités opposées des deux barreaux diamagnétiques *m n* et *op* à se trouver dans le plan horizontal qui contient les axes des aimants, il est facile de voir que ces extrémités étant des pôles de noms contraires, elles doivent exercer sur le système astatique des actions concordantes. On doit donc observer une déviation si ces actions sont sensibles, et, en remplaçant les barreaux diamagnétiques par des barreaux de fer doux, on peut reconnaître si les pôles des corps diamagnétiques sont semblables ou contraires à ceux des corps magnétiques. L'expérience montre qu'ils sont contraires dans tous les cas. On reconnaît aussi que toutes les substances faiblement magnétiques, telles que l'oxyde de fer, le sulfate de nickel, etc., agissent exactement dans le même sens que le fer doux ; il n'y a de différence que dans la grandeur de l'action. Il est essentiel dans ces observations d'éviter toutes les déviations accidentelles, dues soit à l'agitation du sol, soit aux courants d'air qui peuvent exister dans la boîte où tout l'appareil est renfermé. On y parvient en fixant l'appareil à un mur vertical très-solide, en ayant soin de n'opérer qu'aux heures où le sol des rues voisines n'est pas ébranlé par le passage des voitures, et en introduisant dans la boîte du coton ou des morceaux de

papier qui ne permettent pas aux courants d'air de s'établir, tout en laissant parfaitement libre le mouvement des barreaux aimantés. Il n'est pas nécessaire d'employer une pile très-puissante pour produire le courant destiné à parcourir les hélices ; cinq couples de Grove sont suffisants.

M. Tyndall a fait sur l'appareil que nous venons de décrire un très-grand nombre d'expériences [1], dont nous transcrivons ici quelques-uns des résultats. Nous désignons par déviation la différence exprimée en divisions de la règle graduée dont l'image s'observe dans le miroir mobile avec les aimants, entre les deux positions dans lesquelles se place le système astatique quand on fait successivement prendre aux barreaux mobiles dans l'intérieur des hélices deux positions symétriques par rapport au plan horizontal qui contient les axes des aimants. Ainsi, par exemple, avec deux cylindres de bismuth, longs de 76^{mm},2 et de 17 millimètres de diamètre, la position n° 1 (fig. 441) correspondait à 670 divisions, et la position n° 2 (fig. 442) à 630, ce qui donne une différence, soit déviation, de 40 divisions; la position intermédiaire de la fig. 439, correspondait à 650 divisions. En changeant le sens des courants qui parcourent les hélices, on change le sens de la déviation, et, par conséquent, celui de la polarité diamagnétique, ce qui prouve que l'effet des barreaux de bismuth sur le système astatique des deux aimants tient bien à la polarité qu'y développent les courants. La position d'équilibre des aimants étant permanente, il est évident que l'effet observé ne provient point des courants induits, car ces courants n'étant qu'instantanés, ils ne pourraient donner qu'un

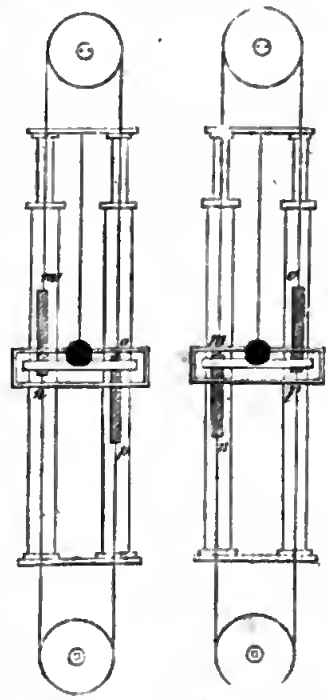


Fig. 441. Fig. 442.

[1] J'ai eu le plaisir d'être témoin de plusieurs de ces expériences, soit seul avec M. Tyndall, soit en présence de MM. Faraday et Marcet.

élan aux aimants, qui reviendraient immédiatement à leur position primitive. D'ailleurs, si les courants induits entraient pour quelque chose dans le phénomène, celui-ci serait beaucoup plus prononcé avec deux cylindres de cuivre, qui, étant 40 fois plus conducteurs que ceux de bismuth, devraient avoir des courants induits 40 fois plus forts. Or, c'est précisément le contraire qui arrive, car avec les cylindres de cuivre on a un effet à peine sensible; la déviation est au plus d'une division. Enfin, M. Tyndall a réussi à démontrer de la même manière l'existence de la polarité diamagnétique dans les corps isolants comme le verre pesant, le spath calcaire, etc., aussi bien que dans les corps conducteurs tels que les métaux, ce qui prouve bien que l'induction n'est pour rien dans les expériences destinées à démontrer l'existence de la polarité, et que celle-ci est bien un phénomène moléculaire. La poudre de bismuth, tassée dans un cylindre de verre, présente aussi la polarité diamagnétique, quoiqu'elle soit incapable de conduire un courant électrique; il en est de même de plusieurs liquides soumis également à l'expérience, et qu'on avait renfermés dans des tubes de verre minces, fermés à leurs extrémités au moyen de bouchons bien nettoyés.

Dans une première série d'expériences, M. Tyndall obtint avec des cylindres de $76^{mm},2$ de longueur et de $17^{mm},8$ de diamètre les déviations suivantes : pour le *bismuth* 40, pour l'antimoine 10, pour le verre pesant[1] 4, pour le spath calcaire 2. Le cuivre ne donna que 1, et le sens de la déviation indiquait qu'il avait pris des pôles magnétiques au lieu de pôles diamagnétiques. Dans une seconde série d'expériences, M. Tyndall a soumis à l'action de son appareil des corps magnétiques aussi bien que des diamagnétiques; il a trouvé ainsi des pôles magnétiques fortement prononcés dans le perchlorure de fer, le carbonate de fer et le sulfate de fer solides[2]. Les dissolutions de

[1] Les morceaux de verre pesant, au lieu d'avoir la forme cylindrique, avaient celle d'un prisme de $76^{mm},2$ de longueur, sur $15^{mm},2$ de largeur, et $12^{mm},7$ d'épaisseur.

[2] L'ordre dans lequel les trois sels de fer sont placés, indique le degré d'énergie de leur polarité magnétique.

sulfate de fer, de chlorure de cobalt et de nickel prenaient aussi des pôles magnétiques. Quant aux corps diamagnétiques, voici les déviations qui résultent de leur polarité dans cette même série d'expériences dans laquelle les effets étaient plus intenses que dans la première : *bismuth solide* 75, *bismuth en poudre* 37, *marbre statuaire*, 5, *phosphore* 4, *soufre* 2, *nitre* 1,75, *cire* 1,25, *eau distillée* 4, *sulfure de carbone* 5,5[1].

Quoique l'existence de la polarité diamagnétique nous paraisse solidement établie par les travaux de M. Tyndall, nous devons ajouter cependant que M. Matteucci était arrivé, à la suite d'un très-grand nombre d'expériences faites avec des hélices traversées par des courants, et disposées de façon que le corps diamagnétique fût mobile dans l'une pendant qu'on agissait avec l'autre sur différents points du corps, à conclure qu'on peut expliquer tous les mouvements d'un corps diamagnétique en présence de deux pôles magnétiques sans recourir à l'hypothèse de la polarité diamagnétique, et il avait remarqué en outre que l'état d'induction n'est pas accompagné, dans les corps diamagnétiques, comme il l'est pour les corps magnétiques, d'une action réciproque entre les éléments, qui donne lieu aux résultantes polaires, et que, pour peu que les dimensions du corps diamagnétique soient grandes, les états qui y sont induits par différents centres de force magnétique, s'y superposent en quelque sorte sans se troubler. Tout en reconnaissant avec M. Matteucci que la polarité diamagnétique n'est pas tout à fait de la même nature que la magnétique[2], nous ne pouvons aller jusqu'à contester comme lui l'existence de la première, que les dernières expériences de M. Tyndall nous paraissent, comme nous venons de le dire, avoir mise hors de doute. Du reste, nous empruntons à M. Matteucci lui-même des faits qui, parfaitement conciliables avec l'hypothèse de la polarité, sont de nature à jeter de nouvelles lumières sur le sujet si intéressant du diamagnétisme. Il a

[1] Les dimensions cylindriques données aux corps diamagnétiques n'étaient pas exactement les mêmes pour tous; les plus faibles étaient celles des deux cylindres de bismuth solide et de bismuth en poudre, qui étaient également pour chacun d'eux de 76^{mm},2 de largeur, sur 17^{mm},8 de diamètre.

[2] Nous avons exposé en quoi les deux polarités diffèrent. (T. I, p. 569 et suiv.)

trouvé que l'état de division des corps diamagnétiques n'exerce aucune influence sur leur degré de diamagnétisme quand ces corps sont isolants, tels que le soufre, la stéarine, etc., tandis que le pouvoir diamagnétique des corps conducteurs augmente notablement avec le degré de division de ces corps, et cela d'autant plus qu'ils sont plus conducteurs. C'est ce qu'il a vérifié surtout pour l'or, l'argent et le cuivre. Il n'a pas trouvé que le bismuth en poudre fût plus diamagnétique que le bismuth en gros fragments; il le serait plutôt moins. Nous avons vu que M. Tyndall a observé que la poudre de bismuth produisait dans son appareil une déviation moitié moindre que celle à laquelle donnaient naissance des cylindres semblables de bismuth massif. L'état de division n'augmenterait donc le diamagnétisme que dans les corps en même temps très-peu diamagnétiques et très-peu conducteurs.

A ces recherches directes sur le diamagnétisme, M. Matteucci en a joint d'autres destinées à saisir, si c'est possible, quelques rapports entre le diamagnétisme et l'induction électro-dynamique; c'est en essayant l'action de l'aimant tournant sur des mélanges de colophane fondue et de poudres métalliques très-fines, qu'il a cherché à établir ces rapports. Ces mélanges, faits soit avec de l'or, soit avec du cuivre, obtenus à un état très-grand de division par des moyens chimiques, sont doués d'un pouvoir diamagnétique qui résulte de la somme des pouvoirs diamagnétiques des quantités de résine et de métal qui les constituent; ils obéissent également à l'action de l'aimant tournant, et, ce qui est assez étonnant, c'est que, passé une certaine limite de petitesse, les poudres les plus fines tournent un peu plus rapidement, ou tout au moins aussi rapidement que les moins fines. Quelques parcelles d'une poudre d'or aussi fine que possible, fixées avec de l'eau gommée à l'extrémité d'un fil de coton délicatement suspendu, obéissent à l'action de l'aimant tournant[1]. Tous ces phénomènes, développés dans ces divers cas par l'électro-aimant tournant, semblent être toujours plus

[1] Voyez, pour ces divers travaux de M. Matteucci, les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLIV, p. 242, 331 et 625; t. XLV, p. 353.

favorables à l'hypothèse de l'induction électro-dynamique moléculaire; mais cette induction différerait du diamagnétisme en ce qu'elle ne pourrait se développer que dans les corps d'une nature conductrice; car, malgré toutes ses tentatives, M. Matteucci n'a jamais pu exercer la moindre action avec l'électro-aimant tournant sur des corps diamagnétiques isolants, soit en masse, soit en poudre. Le diamagnétisme serait donc le fait général, et l'induction électro-dynamique serait une propriété commune aux corps magnétiques comme aux diamagnétiques, mais ne pouvant se manifester que dans ceux de ces corps qui sont d'une nature conductrice.

Nous ne reviendrons pas ici sur la théorie que nous avons donnée des phénomènes magnétiques et diamagnétiques [1]; nous croyons que les nouveaux faits que nous venons de rapporter sont plutôt propres à la confirmer. Que les courants moléculaires préexistent dans les corps magnétiques, et que l'aimantation ne soit que le résultat d'un arrangement particulier des molécules de ces corps, c'est ce qui nous paraît résulter de l'influence toujours mieux constatée des actions mécaniques sur le magnétisme. Quant aux corps diamagnétiques, l'action d'un courant ou d'un aimant ne consiste pas à donner à leurs particules une direction déterminée, puisque ces particules ne sont pas, comme celles des corps magnétiques, entourées de courants préexistants; mais c'est sur les atomes dont chaque particule se compose, que l'action s'exerce, et cette action, analogue à celle qui, dans un corps de grandeur finie, constitue l'induction électro-dynamique, détermine autour de la particule un courant dirigé en sens inverse de celui avec lequel on agit. Si le corps diamagnétique est conducteur, on conçoit qu'il peut arriver que les courants moléculaires se réunissent au premier instant de manière à constituer un courant induit résultant de la rupture de l'équilibre qui existait sous le rapport électrique dans le corps; puis, pendant tout le temps que dure l'action du courant ou de l'aimant extérieur, un nouvel équilibre s'établit dans lequel les courants

[1] Tome I, pages 569 et suiv.

circulent autour de la molécule, ce qui donne aux corps la propriété diamagnétique. Au moment où l'action cessant cet équilibre cesse aussi, un second courant induit semblable au premier, mais dirigé en sens contraire, circule dans le corps, mais seulement aussi si celui-ci est conducteur. Ainsi, dans tous les corps diamagnétiques, l'action extérieure d'un aimant ou d'un courant serait la même sur leurs molécules; mais elle serait accompagnée, chez ceux d'entre eux qui sont conducteurs, d'un premier courant induit au moment où elle commence, et d'un second au moment où elle cesse. Ne se pourrait-il point que chez ceux d'entre eux qui ne sont pas conducteurs, la production des courants induits fût remplacée par celle de quelques traces d'électricité de tension; ce serait une expérience à tenter, quoique peut-être, à cause de la faiblesse probable des signes électriques, elle présentât peu de chances de succès. Quant à l'objection de M. Matteucci contre la polarité diamagnétique, tirée de ce que cette polarité n'est pas accompagnée nécessairement, comme la magnétique, de l'existence de deux pôles opposés, il est facile de comprendre que cette différence tient à la différence même qui existe entre les deux causes qui déterminent, l'une le magnétisme, l'autre le diamagnétisme, La première étant une direction commune et concordante donnée à des courants préexistants, l'opposition de deux pôles en est une conséquence forcée; la seconde n'étant que la production de courants induits dans chaque molécule soumise à l'action extérieure, il n'y a de pôles diamagnétiques que dans les points où l'action s'exerce, et s'il n'y a qu'un point, il n'y a qu'un pôle.

Nous nous bornons à mentionner encore, en terminant ce paragraphe, quelques recherches de MM. Plucker et Beer sur les axes magnétiques des cristaux[1]; ce sujet a perdu beaucoup de son intérêt depuis que MM. Tyndall et Knoblauch ont démontré que tous les phénomènes magnéto-cristallins ne se rattachent point à un nouveau principe, mais qu'ils ne sont que le résultat de l'influence de la structure moléculaire sur des corps

[1] *Annales de chimie et de physique* (*N. S.*), t. XLIX, p. 221.

ou magnétiques ou diamagnétiques, et qu'ils dépendent uniquement des lois qui régissent le magnétisme ou le diamagnétisme; seulement avec la différence que dans les corps cristallisés la polarité tend à se développer suivant certaines directions fixes, tandis que dans les corps non cristallisés, la direction de la ligne des pôles n'est déterminée que par la forme des corps. MM. Plucker et Beer ont soumis à l'expérience un très-grand nombre de cristaux, soit magnétiques, soit diamagnétiques, appartenant aux différents systèmes, à un axe et à deux axes. Leurs résultats sont surtout intéressants pour la cristallographie, car ils obtiennent, par l'étude de l'action magnétique, un nouvel élément à ajouter à tous ceux tirés des phénomènes optiques, de la conductibilité pour la chaleur, pour l'électricité, et autres encore, qui servent à donner une idée de l'arrangement des particules dans les cristaux. M. Faraday a également repris le même sujet [1]; mais en vue d'étudier l'influence de la température sur la force magnéto-cristalline, et il est arrivé à trouver que, dans les mêmes circonstances, la force de direction des corps cristallisés, aussi bien diamagnétiques que magnétiques, diminue sensiblement avec l'élévation de la température. Ce résultat était plus facile à déterminer sur les corps cristallisés que sur ceux qui ne le sont pas, parce que la force directrice du cristal aussi bien de celui qui est diamagnétique, que de celui qui est magnétique, n'étant point influencée par le milieu ambiant comme c'est le cas quand le corps n'est pas cristallisé, on peut élever facilement la température du cristal en le plaçant dans un milieu liquide qu'on chauffe, sans que la présence de ce milieu modifie sa force directrice autrement que par l'influence du changement de température.

§ 7. Propriétés optiques des corps transparents soumis à l'action du magnétisme.

Depuis la publication du premier volume de ce traité dans lequel nous avions fait connaître les phénomènes de la polari-

[1] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXII, p. 55.

sation circulaire magnétique[1], ce sujet a été soumis par M. Verdet à un examen aussi approfondi que détaillé[2]. Au moyen d'un électro-aimant très-puissant et à armures très-larges pour avoir un grand champ magnétique d'égale intensité, M. Verdet est parvenu à déterminer les lois du phénomène; il a d'abord trouvé qu'il y avait proportionnalité entre la rotation du plan de polarisation et l'intensité de la force magnétique; il mesurait cette dernière au moyen du courant d'induction développé dans une bobine placée dans le champ magnétique à laquelle on imprime un mouvement qui rend son plan, de parallèle qu'il était à la ligne des pôles, perpendiculaire à cette ligne. M. Wiedemann[3] avait déjà démontré que la rotation produite par les courants électriques, sans l'intervention du magnétisme, est proportionnelle à l'intensité de ces courants. Les expériences qui ont permis à M. Verdet d'établir sa loi, ont été faites en très-grand nombre sur le verre pesant, le flint ordinaire et le sulfure de carbone. Le même physicien a ensuite considéré les phénomènes qui ont lieu lorsque la direction du rayon lumineux fait un angle quelconque avec la direction de l'action magnétique, et il a trouvé que la rotation est proportionnelle au cosinus de l'angle compris entre les deux directions et par conséquent à la composante de l'action magnétique parallèle au rayon de lumière; il a étendu ses expériences qui ont porté sur les trois mêmes substances, jusqu'à des angles de 80 degrés compris entre la direction du rayon lumineux et celle de l'action magnétique.

Dans des recherches ultérieures[4], M. Verdet a cherché à déterminer au moyen du même appareil très-parfait qui lui avait permis de trouver les lois que nous avons indiquées, le pouvoir rotatoire magnétique de différentes substances; il n'a pas trouvé qu'il existât, comme je l'avais cru[5], de relation entre le pouvoir

[1] Tome I, page 529.

[2] *Annales de chimie et de physique* (*N. S.*), t. XLI, p. 370, et t. XLII, p. 37.

[3] *Annales de chimie et de physique* (*N. S.*), t. XXXIV, p. 121.

[4] *Compte rendu de l'Académie des sciences*, t. XLIII, p. 529, t. XLIV, p. 1209, et t. XLV, p. 33.

[5] T. I, p. 556.

réfringent, soit l'indice de réfraction des différentes substances essayées et leur pouvoir rotatoire magnétique. Ainsi l'indice moyen de réfraction étant pour l'*eau* 1,334, pour le *protochlorure d'étain concentré* 1,426 et pour le *nitrate d'ammoniaque* 1,448, leurs pouvoirs rotatoires magnétiques sont respectivement de 4°,00, de 8°,16 et de 3°,44.

Parmi les substances soumises à l'expérience par M. Verdet, les dissolutions des sels de fer et des autres métaux magnétiques lui ont présenté des phénomènes très-remarquables. Ainsi la présence d'un sel de fer dans l'eau, non-seulement n'augmente pas son pouvoir rotatoire magnétique, mais le diminue, effet qui provient, ainsi qu'il est facile de le prouver, de ce que les sels de fer exercent sous l'influence du magnétisme, sur la lumière polarisée, une action contraire à celle qu'exercent dans les mêmes circonstances, l'eau, le verre, le sulfure de carbone et les autres substances transparentes en général [1]. Cette propriété est désignée sous le nom de pouvoir rotatoire magnétique *négatif*, par M. Verdet, qui donne la dénomination de *positif* à celui des autres substances; en effet, l'eau, le sulfure de carbone, le verre font tourner le plan de polarisation dans le sens où l'électricité positive parcourt le fil conducteur de l'électro-aimant, tandis que les sels de fer le font tourner dans le sens du mouvement de l'électricité négative. Les sels de protoxyde de fer n'ont pas un pouvoir rotatoire négatif assez grand pour faire disparaître entièrement le pouvoir rotatoire positif de l'eau, tandis qu'une solution aqueuse qui contient 40 pour 100 de perchlorure de fer, exerce sur la lumière polarisée une action contraire à celle de l'eau, et six à sept fois plus grande; les dissolutions éthérées et alcooliques donnent les mêmes résultats. Le dissolvant le plus convenable est l'esprit de bois qui peut se charger d'une quantité considérable de sel de fer en restant

[1] C'est en essayant des dissolutions de fer de différentes natures, alcooliques, éthérées, aussi bien qu'aqueuses, que M. Verdet s'est assuré que c'est bien au sel dissous qu'on doit attribuer la diminution toujours la même pour une même quantité de fer, qu'éprouve le pouvoir rotatoire de la substance qui sert de dissolvant. C'est donc bien à un pouvoir rotatoire en sens contraire à celui du dissolvant, possédé par le sel de fer dissous, qu'on doit attribuer la diminution observée.

beaucoup plus transparent que l'eau, l'éther ou l'alcool chargés d'une même proportion de sel; 55 parties de perchlorure de fer dissoutes dans 45 parties d'esprit de bois donnent un liquide très-transparent, dont l'action rotatoire sur la lumière polarisée est presque double de celle du verre pesant, mais de sens contraire; ce liquide a servi à M. Verdet à s'assurer que les lois qui régissent la rotation négative produite par les sels de fer sont les mêmes que pour la rotation positive produite par la généralité des substances transparentes.

Un fait curieux c'est que tous les sels de nickel, contrairement à ceux de fer, ont un pouvoir rotatoire positif, de façon que leurs dissolutions exercent sur la lumière polarisée une action plus grande que celle de l'eau qu'elles contiennent. Des essais sur les sels de cobalt et d'autres métaux magnétiques ont conduit M. Verdet à diviser ces métaux sous le rapport des propriétés qu'ils communiquent à leurs composés transparents, en deux classes dont l'une contient le fer, le chrome, le titane, le cérium, l'uranium et le lanthane, et l'autre le nickel, le cobalt et le molybdène; les sels des premiers métaux ont tous un pouvoir rotatoire négatif et sont en général magnétiques; ceux des seconds un pouvoir positif et plusieurs d'entre eux diamagnétiques. Le manganèse devrait être classé dans la seconde catégorie, car ses composés prennent sous l'influence du magnétisme un pouvoir rotatoire positif, mais il existe un composé, le cyanure double de manganèse et de potassium qui a un pouvoir rotatoire magnétique négatif[1]. Il est assez remarquable que le composé correspondant du fer, savoir, le cyanure *jaune* de potassium et de fer a un pouvoir rotatoire positif, tandis que tous les autres composés du fer, y compris le cyanure *rouge* de potassium et de fer ont un pouvoir négatif. Ajoutons que le cyanure jaune est diamagnétique, tandis que le rouge est magnétique. Les cyanures doubles de nickel et de cobalt ont un pouvoir rotatoire positif; le second est même diamagnétique. Le

[1] Le manganèse semble représenter la liaison entre les deux classes des métaux magnétiques; ce qui est la règle pour les composés de fer, est l'exception pour les composés du manganèse, et *vice versâ*.

nitrate d'urane est diamagnétique quand il a été amené à un grand état de pureté par des cristallisations successives; mais l'oxyde rouge et l'oxyde noir d'uranium sont l'un et l'autre magnétiques. Le carbonate de lanthane parfaitement pur est magnétique. Le molybdène et l'acide molybdique sont magnétiques; mais les molybdates de soude et d'ammoniaque sont diamagnétiques[1].

§ 8. Réduction aux unités mécaniques des mesures d'intensité des courants par MM. Weber et Kohlrausch[2].

On mesure l'intensité des courants par leur action électromagnétique, leur action chimique et quelquefois par leur action électro-dynamique que l'on sait être proportionnelles; mais en général on se contente d'employer celui de ces trois procédés qui paraît le plus approprié aux expériences que l'on a en vue, pour comparer les intensités d'une série de courants, sans s'inquiéter d'obtenir des mesures absolues fondées sur un système d'unités défini indépendamment des appareils particuliers dont on fait usage. M. Weber s'est beaucoup occupé de l'établissement de ces mesures absolues, et il a proposé un système d'unités analogue au système d'unités introduit par Gauss dans la mesure des actions magnétiques.

On sait que, d'après Gauss, l'unité de fluide magnétique est la quantité de fluide qui, étant concentrée sur un point et agissant sur une quantité égale de même fluide pareillement concentrée en un point et placée à l'unité de distance, exerce une répulsion égale à l'unité de force. (L'unité de distance et l'unité

[1] La plupart des échantillons, dont M. Verdet a fait usage, ont été préparés au laboratoire de chimie de l'École normale sous la direction de M. Deville, ce qui est une garantie de leur parfaite pureté. C'est encore à des échantillons fournis par des chimistes distingués qui travaillent dans le même laboratoire, M. Troost et M. Debray, que M. Verdet doit d'avoir pu constater que le lithium et le glucinium, ainsi que leurs composés, sont diamagnétiques.

[2] *Mémoires de la Société royale des Sciences de Saxe*, t. V, p. 221. *Annales de chimie et de physique*, t. XLIX, p. 115.

de poids adoptées par Gauss, sont le millimètre et le milligramme.)

L'unité d'intensité électro-magnétique proposée par M. Weber est l'intensité d'un courant qui, traversant un conducteur circulaire dont l'aire est égale à l'unité de surface, et agissant sur un aimant dont le moment magnétique est égal à l'unité, placé à une très-grande distance, de façon que son axe soit parallèle au plan du conducteur circulaire, et que son milieu se trouve sur la perpendiculaire à ce plan menée par le centre du conducteur, donne naissance à un couple dont le moment est égal à l'unité divisée par le cube de la distance du milieu de l'aimant au centre du conducteur.

L'unité d'intensité électro-dynamique est l'intensité du courant qui, traversant un conducteur circulaire dont l'aire est égale à l'unité, et agissant sur un courant égal qui traverse un autre conducteur circulaire identique au précédent et placé à une très-grande distance, de façon que son plan soit perpendiculaire à celui du premier conducteur, et que l'intersection des deux plans soit un diamètre du premier conducteur, donne naissance à un couple dont le moment est égal à l'unité divisée par le cube de la distance des centres des deux conducteurs.

L'unité d'intensité électro-chimique est l'intensité du courant qui, traversant un voltamètre, décompose pendant l'unité de temps l'unité de poids d'eau, ou une quantité équivalente d'un électrolyte quelconque. L'unité d'intensité électro-chimique est à l'unité d'intensité électro-magnétique, comme 106,66 est à 1.

Établissant aussi une mesure absolue pour l'électricité statique, en prenant pour unité de fluide électrique la quantité qui, étant concentrée en un point, et agissant sur une quantité égale de même fluide, parcillement concentrée en un point et placée à l'unité de distance, exerce une répulsion égale à l'unité de force, M. Weber, de concert avec M. Kohlrausch, s'est occupé de déterminer la quantité absolue d'électricité qui traverse pendant l'unité de temps la section quelconque d'un conducteur où circule un courant d'intensité égale à l'unité. La méthode qu'ils ont suivie consiste à déterminer l'intensité, et la

durée du courant qui donne à l'aiguille d'un galvanomètre la même impulsion que la décharge d'une quantité donnée d'électricité.

Sans entrer dans le détail des expériences, nous indiquerons ici la suite des opérations.

On mesure la fraction de la charge de l'armature interne d'une bouteille de Leyde, que cette armature communique à une sphère métallique qui est mise en contact avec elle, et pour cela on met en communication avec un électromètre l'armature intérieure de la bouteille, avant et après un nombre de contacts déterminés de la sphère.

Ensuite, on mesure simultanément l'impulsion donnée à l'aiguille du galvanomètre par la décharge de la bouteille de Leyde, et l'action qui s'exerce entre les boules de la balance de torsion chargées d'une fraction connue de l'électricité de la bouteille. Pour cela, après avoir chargé la bouteille, on en touche l'armature interne avec la sphère métallique dont nous avons parlé, et cette sphère, mise en contact avec la boule fixe de la balance de torsion, communique une fraction de sa charge électrique que l'on peut déterminer en connaissant les diamètres des deux sphères. La balance de torsion donne la mesure absolue d'électricité de la boule fixe, et on peut remonter de là à celle de l'électricité de la bouteille, en tenant compte aussi de la déperdition qui a lieu entre le moment où on l'a mise en contact avec la sphère métallique et celui où on la décharge. Un second observateur décharge la bouteille après un nombre de secondes déterminé à partir de l'instant du contact, et il note l'amplitude de la déviation de l'aiguille.

Il ne s'agit plus maintenant que de déterminer la durée T que devrait avoir un courant d'intensité égale à l'unité électro-magnétique, pour donner à l'aiguille la même vitesse que lui donne le passage instantané de la quantité d'électricité E précédemment mesurée. On peut conclure de là que, lorsque ce courant traverse un fil, il passe pendant un temps T par une section donnée de ce fil une quantité d'électricité égale à E, et comme le courant est constitué par le mouvement de quantités égales de fluide positif et négatif marchant en sens contraires,

cela revient à dire que, pendant le temps T, une section du fil est traversée par une quantité $\frac{E}{2}$ d'électricité positive dans un sens, et par une quantité $\frac{E}{2}$ d'électricité négative dans l'autre. Pendant l'unité de temps, il passera par chaque section du fil une quantité $\frac{E}{2T}$ de fluide positif et une quantité égale de fluide négatif.

Pour calculer cette durée T, les données expérimentales sont l'angle de déviation de l'aiguille du galvanomètre sous l'action de l'électricité E, et les constantes de l'appareil relatives soit à l'aiguille elle-même, soit à son fil de suspension.

MM. Weber et Kohlrausch ont exécuté cinq séries d'expériences qui leur ont donné en moyenne, pour la valeur de $\frac{E}{2T}$ le nombre 155,370,000,000. Ainsi, par chaque section d'un fil où circule un courant d'intensité égale à l'unité électro-magnétique, il passe pendant l'unité de temps 155,370 millions d'unités d'électricité positive, et une quantité égale d'électricité négative marchant en sens contraire.

§ 9. Recherches relatives à la conductibilité.

L'étude de la propagation de l'électricité dans les corps conducteurs, et la détermination de la conductibilité électriqu qui s'y lie intimement, est un des sujets qui ont le plus occupé les physiciens, tant à cause de son importance théorique qu'à cause des applications pratiques qu'il présente. Nous avons déjà fait connaître bien des travaux parmi ceux qui ont pour objet ces questions [1]; et cependant, depuis la publication de notre second volume, il a paru de nouvelles recherches parmi lesquelles nous avons distingué celles de MM. Mousson, Thomson et Matthiessen.

M. Mousson [2], frappé des divergences que présentent les ré-

[1] Tome II, pages 33 et suivantes.

[2] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXI, p. 111.

sultats obtenus par divers expérimentateurs dans la détermination des résistances des différents métaux, quoique cette détermination ait pour objet l'un des phénomènes les plus simples, puisqu'il n'est compliqué ni par des décompositions chimiques, ni par le transport de particules, a voulu essayer d'analyser les causes de ces divergences. Le procédé employé pour mesurer les résistances des fils soumis à l'expérience était le suivant : le courant, provenant d'un seul couple de Daniell faiblement chargé, se bifurquait après avoir passé par un galvanomètre à tangentes en parcourant d'une part le fil sur lequel portait l'examen, et de l'autre le fil d'un rhéostat, puis traversait les points de dérivation du pont galvanique [1], parcourait ensuite les parties identiques des embranchements et se confondait de nouveau dans le fil qui retournait au couple. L'influence de la nature du contact sur la résistance est très-prononcée; la jonction par soudure ou par l'immersion dans le mercure avec amalgamation sont celles qui ne paraissent pas produire de résistance appréciable; le simple contact même avec pression en offre une d'autant plus grande que la pression est moindre. L'influence d'un liquide ambiant sur la conductibilité d'un fil métallique est presque nulle, sauf qu'il en résulte une diminution de résistance par le seul fait du refroidissement produit par l'immersion du fil dans le liquide. La tension augmente sensiblement la résistance d'un fil à la conductibilité; non-seulement parce qu'elle diminue son diamètre et augmente sa longueur, mais aussi d'une manière *plus directe*, car les seuls changements de dimension ne suffisent pas pour expliquer cette influence. Par contre l'ébranlement, soit les vibrations imprimées à un fil d'acier et à un fil de cuivre, ne modifie en rien leur conductibilité. L'influence du diamètre, quoique ramenée à une loi très-simple qu'ont vérifiée un grand nombre de physi-

[1] Le galvanomètre est placé sur cette communication directe entre les deux embranchements, qu'on nomme *pont galvanique;* et si on a soin de former de deux fils identiques les deux parties des embranchements qui concourent au point de dérivation du pont, l'aiguille du galvanomètre ne pourra rester en équilibre qu'autant que les deux premières parties des embranchements présenteront des résistances identiques.

ciens, a présenté à M. Mousson une anomalie qui consiste dans une résistance constante, indépendamment du diamètre des fils, et qui tient probablement à un effet qui a lieu aux extrémités, là où le courant entre ou sort. La configuration d'un fil, en tant qu'elle modifie sa constitution intérieure, réagit sur sa résistance à la conductibilité en proportion de la grandeur et de l'étendue de l'altération ; mais l'enroulement d'un fil, même à l'état ductile, est accompagné constamment de changements moléculaires qui produisent un accroissement souvent très-sensible de la résistance. L'*écrouissage*, la *trempe* et le *recuit*, trois opérations qui altèrent profondément la nature intérieure des fils métalliques, modifient tout aussi fortement leur résistance ; c'est ce qu'avaient déjà observé MM. Pouillet et E. Becquerel. M. Mousson, en confirmant les résultats obtenus par ces deux physiciens, y a ajouté une observation curieuse, c'est que le cuivre écroui par la filière, subit, comme l'acier sortant de la filière, une augmentation de résistance par le recuit; l'effet de la trempe est tout différent, puisque la résistance de l'acier, comparée à ce qu'elle était à l'état recuit, s'accroît de près d'un quart, tandis que celle du cuivre diminue, mais d'un quarantième seulement. L'influence de la température a été, de la part de M. Mousson, l'objet d'expériences très-nombreuses et très-soignées; il a trouvé également en défaut les lois énoncées par M. E. Becquerel et par M. Lenz. Le premier admettait jusqu'à 200° la proportionnalité entre l'accroissement de la résistance et celui de la température; or, le coefficient qui représente le rapport de ces deux accroissements augmente même au-dessous de 200° d'une manière très-évidente. Le second tirait comme conséquence de ses formules l'existence d'un *maximum de résistance* à une température particulière pour chaque métal; or, l'expérience a donné à M. Mousson, pour le fer, une progression continuellement ascendante jusqu'à la plus forte incandescence qu'un bon chalumeau fût capable de produire. Ainsi, tout considéré, la loi exponentielle est celle qui, dans l'état actuel de nos connaissances, répond le mieux aux observations. M. Mousson termine son travail par une étude du rhéostat dont l'emploi doit être, suivant lui, ac-

compagné de grandes précautions, si l'on veut éviter les erreurs graves auxquelles peuvent donner lieu les diverses influences qu'il a étudiées.

M. Mousson n'avait pas trouvé que le magnétisme exerçât d'influence sur la conductibilité électrique du fer. M. Thomson, dans une étude sur les propriétés électro-dynamiques des métaux [1], est parvenu à montrer que l'aimantation dans le sens de la longueur diminue la conductibilité électrique du fer, et que cette conductibilité est plus grande perpendiculairement que parallèlement aux lignes d'aimantation; ce qui est d'accord avec les phénomènes moléculaires qui accompagnent l'aimantation, puisque par cette action les particules sont éloignées dans le sens longitudinal et rapprochées dans le sens transversal.

Nous avons décrit, dans notre second volume, les procédés de M. Becquerel et de M. Pouillet, pour mesurer la conductibilité des différents métaux; ces procédés reposent sur l'usage du galvanomètre différentiel, qui permet de constater quelle est la longueur du fil type dont la résistance est équivalente à celle du fil du métal dont on cherche la conductibilité. L'emploi du galvanomètre différentiel offre des difficultés assez grandes qu'une méthode, inventée par M. Kirchoff [1], supprime complétement; cette méthode, dont on nous saura gré de donner la description, est fondée sur un cas particulier des courants dérivés, celui où l'intensité du courant dans un fil de dérivation est nulle par suite des valeurs qu'on donne aux résistances de certaines parties du circuit. Soit en effet P (fig. 443) une pile dont les pôles sont réunis par le conducteur *p a d b; a b* est un fil de dérivation et *c d* un conducteur qui réunit les deux courants dérivés; les résistances et les intensités sont désignées dans les cinq branches du circuit que nous avons à considérer par les lettres λ et *i*.

Fig. 443.

[1] *Philosophical magazine*, novembre 1856, et *Annales des sciences physiques*, t. XXXIV, p. 149.

D'après les lois de Kirchoff, dont nous avons déjà parlé [1] sur la théorie générale des courants dérivés, on peut établir les relations suivantes :

$$\begin{aligned} i &= i_2 + i_3 ; \\ i_3 &= i_5 + i_4 ; \\ i_3 \lambda_3 + i_1 \lambda_1 + i_5 \lambda_5 &= o ; \\ i_2 \lambda_2 + i_4 \lambda_4 + i_5 \lambda_5 &= o ; \end{aligned}$$

Au moyen de ces quatre équations, nous pouvons exprimer i_5 en fonction d'une seule des autres intensités, i_5 par exemple, et on trouve aisément en éliminant les autres :

$$i_5 (\lambda_1 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_4 - \lambda_2 \lambda_3 - \lambda_4 \lambda_5) = i_3 (\lambda_2 \lambda_3 - \lambda_1 \lambda_4).$$

Par conséquent, quelle que soit la valeur de i_5, si les résistances λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 satisfont à la relation $\lambda_2 \lambda_3 = \lambda_1 \lambda_4$, l'intensité i_5 est nulle, c'est-à-dire qu'il ne passe pas de courant dans le conducteur *c d*.

Introduisons maintenant un galvanomètre dans *c d*, puis dans *b d* le fil de métal à expérimenter, dont la résistance inconnue est x, ainsi qu'un rhéostat; au moyen de ce dernier, on fait varier λ_4, jusqu'à ce que sa valeur satisfasse à la relation ci-dessus, ce qu'indique le galvanomètre dont l'aiguille est ramenée au 0°. On enlève alors le fil et on ramène de nouveau, à l'aide du rhéostat, l'aiguille du galvanomètre au 0°; la longueur de fil qu'il a fallu ajouter, donne la valeur de x, la résistance cherchée [2].

[1] Tome II, page 829.

[2] M. Quincke (*Ann. der Poggendorff*, t. XCVII, p. 382, mars 1856, et *Ann. de ch. et de phys.*, t. XLVII, p. 203), dans un Mémoire sur la propagation de l'électricité dans les plaques métalliques, s'est proposé de vérifier par l'expérience la théorie de M. Kirchoff (t. II, p. 829), que ce savant n'avait soumise à l'expérience que dans le cas d'une plaque circulaire, communiquant par deux points de sa circonférence avec les électrodes d'une pile. M. Quincke a examiné deux autres cas un peu moins simples, et a trouvé, comme M. Kirchoff, un accord très-satisfaisant entre l'expérience et la théorie. Le premier cas est celui d'une plaque carrée dans laquelle l'électricité arrive par un des sommets, et par un point pris sur la diagonale qui passe par ce sommet. Le deuxième cas est celui d'une plaque hétérogène, composée d'une plaque semi-circulaire de plomb et d'une plaque semi-circulaire de cuivre, soudées ensemble suivant leur diamètre

M. Matthiessen[1] a appliqué la méthode de M. Kirchoff à la détermination de la conductibilité électrique de quelques métaux les plus oxydables, dont les propriétés physiques ont pu être étudiées depuis les progrès qui ont été réalisés dans leur préparation. C'est dans le laboratoire de M. Kirchoff, à Heidelberg, que M. Matthiessen a fait ses expériences.

La principale difficulté que présentaient ces recherches était la fabrication de fils fins et homogènes de ces métaux. M. Matthiessen l'a surmontée en faisant passer les métaux à la filière par pression au lieu d'opérer par traction, comme cela se fait d'ordinaire. Le métal était introduit dans une petite cavité cylindro-conique pratiquée dans une pièce d'acier, présentant au sommet du cône qui la terminait une petite ouverture. On enfonçait dans cette cavité un piston d'acier de même forme, et, en exerçant sur ce piston une pression suffisante, on faisait sortir le métal sous forme de fil par l'orifice de la cavité. Dans le cas du potassium, du sodium et du lithium, qui sont à la fois très-ductiles et très-oxydables, l'opération avait lieu dans l'huile de naphte. Dans le cas du magnésium, qui est très-peu ductile et assez peu oxydable, on échauffait la presse à l'aide d'une lampe d'émailleur, et par conséquent on opérait dans l'air. Enfin, dans le cas du strontium et du calcium, qui ne sont pas plus ductiles que le magnésium, mais beaucoup plus oxydables, on échauffait la presse et on recevait le fil immédiatement à sa sortie dans un tube plein d'huile de naphte.

commun, les électrodes de la pile communiquant avec deux points de la circonférence de la même plaque semi-circulaire, situés à égale distance de la ligne de soudure. M. Quincke a pu, d'après l'ensemble de ses expériences dans ce dernier cas, qui lui donnaient les lignes d'égale tension de la plaque de plomb et de la plaque de cuivre, calculer les rapports de la conductibilité du plomb et du cuivre qu'il avait employé dans ses recherches; ce rapport a été celui de 12,47 à 100. Le moyen employé par M. Quincke pour le plomb et le cuivre pourrait servir également à déterminer d'une manière très-exacte, et sans avoir besoin de les réduire en fils, le rapport de conductibilité des divers autres métaux au cuivre. Nous ne sachons pas qu'il ait été mis en pratique dans d'autres cas que dans celui que nous venons de citer.

[1] *Philosophical magazine*, 4e série, t. XIII, p. 81. *Annales de chimie et de physique*, t. L, p. 192.

Les résistances étaient, comme nous l'avons dit, mesurées par la méthode de M. Kirchoff. Le fil de comparaison était un fil de cuivre dont la conductibilité avait été soigneusement comparée à celle de l'argent. En désignant par 100 celle de l'argent, M. Matthiessen a trouvé les nombres suivants :

Sodium	37,43 à la température de	21°,7
Magnésium	25,47	17°,0
Calcium	22,14	16°,8
Potassium	20,85	20°,4
Lithium	19,00	20°,0
Strontium	6,71	20°,0

Les nombres relatifs au potassium et au sodium présentent seuls un peu d'incertitude à cause de la rapide oxydation de ces métaux.

M. Matthiessen a étudié l'influence de la température sur la conductibilité du potassium et du sodium ; ces métaux étaient fondus dans des tubes de verre plongés dans une dissolution de chlorure de calcium et ne communiquaient avec l'extérieur que par de petites colonnes de mercure. La conductibilité de ces métaux diminue quand la température s'élève et elle est beaucoup plus faible à l'état liquide qu'à l'état solide. Pour le sodium, il y a un saut brusque à la température de fusion de 93° 4 ; pour le potassium, il y a une variation très-rapide entre 47° et 57°, mais point de saut brusque.

§ 10. Nouvelles expériences pour prouver que la transmission de l'électricité à travers les liquides est toujours accompagnée de leur décomposition électrolytique.

L'opinion que les liquides composés peuvent conduire l'électricité à la façon des corps solides conducteurs sans être par conséquent décomposés, ne nous avait pas paru pouvoir être adoptée malgré l'autorité imposante de Faraday[1]. L'illustre physicien avait invoqué particulièrement en faveur de cette opinion le

[1] Tome II, pages 316 et 359.

fait que l'eau se conduit comme les métaux dans les phénomènes de l'électricité statique. Or trois physiciens ont montré que, même lorsqu'il s'agit de cette électricité, la propagation électrique dans un liquide est accompagnée de sa décomposition.

M. Andrews[1], au moyen d'un artifice très-simple, a obtenu la décomposition polaire de l'eau avec une machine électrique ordinaire; cet artifice consiste à recueillir les gaz dans des tubes capillaires dans lesquels pénètrent par l'extrémité fermée des fils très-fins de platine, ce qui soustrait ces gaz à l'action dissolvante qui a lieu quand les électrodes plongent dans une grande masse d'eau. Si les tubes sont gradués, on reconnaît que les volumes des deux gaz sont bien dans le rapport de 1 à 2, et il est facile de s'assurer que l'un est de l'oxygène et l'autre de l'hydrogène. Une machine à plateau, faisant deux cent quarante tours par minute, a dégagé pendant ce temps environ 66 millièmes de millimètre cube d'oxygène. Au moyen d'un cerf-volant, M. Andrews s'est servi de l'électricité atmosphérique pour faire la même expérience, et il a obtenu en une heure, par un temps serein et nullement orageux, 54 millièmes de millimètre cube.

M. Buff, qui avait déjà réussi à rendre apparente la décomposition de l'eau, même avec un courant excessivement faible, en employant des fils de platine soudés dans des tubes de verre, de manière que l'extrême pointe métallique fût seule à découvert[2], avait également établi la proportionnalité entre la quantité d'eau décomposée et l'intensité du courant, même lorsque la quantité d'hydrogène dégagé en une heure atteignait seulement la quatre-vingtième partie d'un centimètre cube. Pour confirmer la conséquence contraire à l'idée de la conductibilité physique des liquides, qu'il avait déjà tirée de ses premières expériences, il a fait de nouvelles recherches[3] en employant l'électricité des machines électriques ordinaires; il a obtenu par ce moyen la décomposition polaire de l'eau, comme M. Andrews,

[1] *Annales de chimie et physque* (*N. S.*), t. L, p. 124.
[2] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXIX, p. 118.
[3] *Idem*, t. XXXI, p. 198.

et même de plus celle du sulfate de cuivre dissous. Puis il a fait communiquer deux pointes de platine à la Wollaston, plongeant par-dessous dans deux cloches pleines d'eau, placées dans le même vase, l'une avec le conducteur positif, l'autre avec le conducteur négatif de la machine électrique; les cloches étaient armées dans leur partie supérieure de pointes de platine, qui permettaient de s'en servir comme d'eudiomètres, afin de pouvoir s'assurer si les produits gazeux étaient un mélange d'oxygène et d'hydrogène, ou ces deux gaz séparés. Il a constaté que les deux gaz étaient séparés et se trouvaient dans chaque tube dans la proportion qui constitue l'eau; puis, ayant fait passer la même décharge successivement à travers deux voltamètres remplis, l'un d'eau pure, l'autre d'acide sulfurique étendu à la densité de 1,15, il a obtenu, après avoir fait tourner la machine pendant 90 minutes, $27^{mm.c.}$ 954 d'hydrogène dans l'eau acidulée et $27,268^{mm.c.}$ dans l'eau pure, ce qui ne fait qu'une différence bien petite facilement explicable par la plus grande solubilité des gaz dans l'eau pure. Le résultat n'est plus le même quand, au lieu de mettre les pointes directement en communication avec la machine électrique, on laisse une interruption dans le circuit et que l'électricité traverse cet espace sous la forme d'étincelles; alors les quantités de gaz recueillies sont plus considérables aux électrodes négatifs, et l'oxygène et l'hydrogène y sont mélangés; toutefois, après avoir obtenu une diminution de volume en faisant passer à travers le mélange gazeux une étincelle électrique, on trouve un excès d'hydrogène, ce qui prouve que la décomposition polaire a eu également lieu, mais qu'il s'y est ajouté la décomposition calorifique; la première des décompositions est proportionnelle à l'intensité du courant, tandis que la seconde dépend de la rapidité avec laquelle l'électricité doit vaincre la résistance du liquide, résistance qui entraîne une élévation considérable de température. La décomposition calorifique est plus abondante dans l'eau pure que dans l'eau acidulée, à cause du plus grand développement de chaleur qui a lieu dans la première au point de contact de l'électrode et du liquide, tandis que la décomposition électrolytique est la même dans les deux liquides. On remarque toujours un léger dégage-

ment de lumière à l'extrémité de la pointe plongée dans l'eau, quand le circuit n'étant pas continu, on a la décomposition calorifique, et on observe également dans ce cas que les électrodes sont polarisés, parce que la décomposition électrolytique a lieu également. Une jolie expérience de M. Buff, qui montre que la décomposition électrolytique a lieu aussi bien lorsqu'il n'y a qu'un électrode métallique que lorsqu'il y en a deux, consiste à prendre un tube fermé en haut avec une pointe de platine qui pénètre dans de l'hydrogène dont ce tube est à moitié rempli, pendant que l'autre portion remplie d'eau communique avec l'eau extérieure; on fait communiquer la pointe de platine, tantôt avec le conducteur négatif, tantôt avec le conducteur positif de la machine électrique, pendant que l'eau communique avec le sol; si l'on fait marcher la machine pendant quelque temps, on voit, dans le premier cas, augmenter le volume de l'hydrogène, preuve que ce gaz se dégage au contact de l'eau, et dans le second cas, le volume diminue parce que c'est de l'oxygène qui se dégage. On obtient même une décomposition évidente en mettant l'eau en communication avec le conducteur positif de la machine par l'intermédiaire d'une pointe de Wollaston, et en approchant simplement de la surface de l'eau la main ou un autre conducteur qu'on tient à une assez grande distance pour qu'il n'y ait point d'étincelles. Évidemment, dans ce cas comme dans le précédent, l'air ou le gaz joue le rôle d'électrode négatif et produit un dégagement de gaz sur tous les points de la surface de l'eau.

Ce n'est pas seulement quand l'électricité chemine sous forme de décharge à travers l'eau, que sa propagation est accompagnée de la décomposition de ce liquide, il y a encore une action électrolytique quand l'électricité est mise en mouvement par un effet d'influence. C'est ce qu'a prouvé M. Soret[1] dans une expérience dont il a eu l'idée et que j'ai réalisée avec lui : elle consiste à prendre de l'eau pure pour armures intérieure et extérieure d'une bouteille de Leyde, dont la couche isolante est formée par un bocal de verre très-élevé, verni avec soin en

[1] *Archives des sciences physiques*, t. XXXI, p. 201.

dedans et en dehors, afin que l'isolement soit parfait. On introduit au fond de ce bocal une certaine quantité d'eau qui doit servir d'armure intérieure, et dans laquelle on fait arriver l'électricité positive d'une machine électrique au moyen d'une chaîne de laiton. L'eau qui sert d'armure extérieure est renfermée dans un vase en verre bien isolé, au centre duquel est placé le bocal qui fait l'office de couche isolante; dans cette eau plongent deux lames de platine parfaitement décapées, soudées chacune à un fil du même métal, et soutenues par des tiges de verre s'appuyant sur les bords du vase. On commence par s'assurer, en mettant les deux lames de platine en communication avec les deux bouts d'un galvanomètre très-sensible, qu'il n'y a production d'aucun courant; puis, après avoir détaché les fils du galvanomètre, on met une des lames de platine en communication avec le sol et on fait marcher la machine électrique. Après trois tours de plateau on interrompt la communication de la lame avec le sol, et on décharge la bouteille en plongeant dans l'eau du vase extérieur l'extrémité d'une tige de laiton recourbée et en touchant avec l'autre extrémité la chaîne métallique qui plonge dans l'eau du vase intérieur. On enlève ensuite la tige de cuivre, on rétablit la communication de la lame de platine avec le sol et on recommence à charger. Dans plusieurs expériences on a effectué seize charges et décharges consécutives, ce qui exigeait quarante-huit tours de plateau. Lorsqu'après ces seize charges on mettait les lames de platine en communication avec les fils du galvanomètre, on observait un courant qui faisait dévier l'aiguille de 25 à 30 degrés environ. Le sens du courant indiquait que c'était la lame de platine communiquant avec le sol qui avait été polarisée positivement, et sur laquelle, par conséquent, l'hydrogène s'était déposé; ce qui, en effet, devait être, puisque l'électricité positive décomposée par influence devait s'en aller par cette lame dans le sol. L'expérience a été répétée un grand nombre de fois et a donné constamment les mêmes résultats; toutes les précautions avaient été prises pour éviter tout écoulement de l'électricité le long des parois de verre du bocal, et on s'est assuré directement que cet écoulement n'avait pas lieu.

C'est une chose assez remarquable que d'obtenir une décomposition électrolytique avec un seul électrode; il est probable que tandis que l'hydrogène se dégage à la surface de la lame de platine par laquelle l'électricité positive s'écoule dans le sol, il y a un dégagement d'oxygène à la surface de l'eau, en contact avec la couche isolante. Au reste, on peut facilement constater que la polarisation de l'électrode, et, par conséquent, la décomposition électrolytique, est aussi forte quand il n'y a qu'un électrode que lorsqu'il y en a deux. Pour cela, il n'y a qu'à transmettre, au moyen de deux nouvelles lames de platine semblables aux premières, à travers de l'eau renfermée dans un second bocal de verre, l'électricité positive qui, sortant de l'eau du premier, se rendait dans le sol, et on trouve, en reliant successivement au galvanomètre les deux paires de lame de platine, très-sensiblement la même déviation de l'aiguille pour chacune, lorsqu'on a opéré les seize décharges consécutives.

Nous devons encore mentionner les expériences par lesquelles M. Despretz avait cru trouver qu'un faible courant voltaïque peut être transmis à travers l'eau sans la décomposer [1]; mais nous devons ajouter que MM. Logeman et Van-Breda [2] ont démontré que, dans ce cas comme dans d'autres semblables, la décomposition électrolytique, quoique non apparente, avait bien lieu, puisque les électrodes étaient toujours polarisés.

§ 11. Phénomènes de transport dans l'électrolyse.

Il y a, comme on le sait, deux espèces de transport dans la transmission d'un courant à travers un liquide décomposable; l'un que j'appellerai transport *chimique*, qui est celui en vertu duquel l'acide du sel d'une dissolution se montre à l'électrode positif et la base à l'électrode négatif; l'autre le transport *mécanique*, en vertu duquel le liquide lui-même est porté du pôle positif au négatif avec une énergie d'autant plus grande qu'il est moins conducteur. Nous avons exposé en détail les recher-

[1] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXII, p. 38.
[2] *Idem*, t. XXXIII, p. 14.

ches qui ont été faites sur ce dernier point, et en particulier celles de M. Wiedemann[1]. Dès lors, MM. Van-Breda et Logemann, et M. Wiedemann lui-même, ont soumis la question à de nouvelles expériences. MM. Van-Breda et Logeman[2] ont cherché en vain à découvrir un mouvement mécanique des molécules d'un liquide traversé par un courant quand il n'y a pas de diaphragme, et cependant leurs expériences ont été conduites de façon que si ce mouvement avait existé, il aurait dû se manifester. Ainsi, ils n'ont pu trouver aucune différence dans le niveau de l'eau traversée par un fort courant électrique, au pôle positif et au pôle négatif; ainsi encore ils n'ont aperçu aucune accélération ni aucun retard dans la vitesse d'écoulement de l'eau placée dans un vase de Mariotte suivant que le courant qui la traversait cheminait dans le sens de l'écoulement ou en sens contraire. Les phénomènes se passent tout différemment dès qu'il y a un diaphragme poreux, et cependant ce diaphragme rendu mobile n'est nullement entraîné dans le même sens que le liquide, ce qui devrait être si le mouvement était vraiment l'effet d'une action mécanique directe que l'électricité exerce sur le liquide, et qui pousse les molécules liquides à travers les pores du diaphragme. Du reste, MM. Van-Breda et Logemann ont vérifié toutes les lois du phénomène telles qu'elles avaient été données par M. Wiedemann, et les ont trouvées parfaitement exactes. Ils ont également confirmé le résultat que j'avais obtenu[3], savoir : que les quantités de gaz développées dans le même temps dans deux voltamètres successifs, chargés l'un avec de l'eau acidulée, l'autre avec de l'eau pure et un diaphragme, sont sensiblement égales, lors même que dans le second voltamètre il s'opère un transport mécanique du liquide qui n'existe pas dans le premier.

M. Wiedemann, dans ses nouvelles recherches sur ce sujet[4], ne conteste point les résultats obtenus par MM. Van-Breda et

[1] Tome II, pages 373 et suiv.
[2] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXIII, p. 5.
[3] Tome II, page 379.
[4] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXIII, p. 177.

Logemann, qu'il avait lui-même observés; mais il n'en persiste pas moins à voir deux phénomènes distincts quand un courant traverse un liquide décomposable, l'action électrolytique et l'action de transport. La première a toujours lieu en même temps que la seconde, avec laquelle elle est liée par certains rapports. Un très-grand nombre d'expériences faites avec le plus grand soin sur l'électrolyse des dissolutions salines et acides, conduisent M. Wiedemann à constater l'exactitude des résultats obtenus par Daniell et par M. d'Almeida, que nous avons fait connaître. Ces mêmes électrolyses, faites avec l'adjonction d'une paroi poreuse qui sépare hermétiquement en deux portions distinctes le liquide soumis à l'électrolyse, montrent que la quantité de la base transportée du pôle positif au négatif est plus grande quand on interpose une paroi poreuse que quand il n'y en a pas. Ce transport est moindre dès qu'il s'agit de dissolutions d'acide sulfurique ou nitrique pour lesquelles le transport a lieu du pôle négatif au positif quand on opère sans paroi poreuse. Avec une paroi poreuse, outre la base, le liquide lui-même, comme on le sait, est transporté au pôle négatif, et le volume de la dissolution y augmente. Ce transport est sensible même avec les liquides les plus conducteurs, comme les dissolutions salines; mais cependant il est d'autant plus prononcé que la résistance du liquide à la conductibilité électrique est plus grande.

Si l'augmentation de volume est produite seulement par le transport mécanique du liquide inaltéré, on voit que pour des concentrations différentes les quantités du liquide transporté sont à peu près en raison inverse de la quantité de sel dissous, et contiennent par conséquent à peu près la même quantité absolue de sel. En résumé, M. Wiedemann est arrivé par ses recherches à croire que, dans le phénomène de l'électrolyse, le courant qui pénètre dans le liquide se divise en deux parties dont l'une, la plus grande, est transmise à travers le sel, et l'autre, beaucoup plus petite, traverse l'eau. L'action purement électrolytique consisterait en ce que l'électricité qui sort par l'électrode positif attire l'élément électro-négatif de la molécule de sel la plus rapprochée, tandis que l'élément élec-

tro-positif (le métal) reste à sa place pendant que l'élément électro-négatif marche vers l'électrode positif. C'est ainsi que le métal est séparé de l'oxygène et de l'acide, et qu'il se combine avec l'élément électro-négatif de la molécule suivante, et ainsi de suite, en sorte qu'à la fin il se dépose sur l'électrode négatif, tandis que l'oxygène et l'acide s'accumulent au positif s'il est en platine; mais s'il est en cuivre par exemple, quand il s'agit de l'électrolyse du sulfate de cuivre, il s'y dissout autant de cuivre qu'il s'en dépose à l'électrode négatif. On voit que cette théorie est à peu près celle que nous avons donnée de l'électrolyse; seulement M. Wiedemann y ajoute à côté de l'action électrolytique une action mécanique qui a lieu pour le sel aussi bien que pour l'eau, mais qui est beaucoup plus prononcée pour la partie du courant qui passe par l'eau, dont l'effet électrolytique est par suite très-faible. Des expériences ont montré en effet que, pendant la décomposition d'un gramme d'eau, il y a un transport d'environ 5,600 grammes d'eau à travers une paroi poreuse, ce qui fait supposer à M. Wiedemann que dans le plus grand nombre des cas le travail employé à cette dernière action est bien plus grand que celui qui produit la décomposition; mais il nous paraît impossible de comparer ces deux genres de travail, vu la nature différente des deux espèces de force nécessaires pour l'un et pour l'autre, le second exigeant probablement des forces d'une bien plus grande intensité que le premier. Suivant M. Wiedemann, ce qui s'oppose au transport, c'est la viscosité du liquide; la résistance électrique doit donc avoir un rapport très-simple avec cette viscosité, à laquelle elle doit être proportionnelle, tandis qu'elle est d'autant moindre que la quantité de sel dissous dans le même volume est plus grande. Le degré de la viscosité a été déterminé par le temps qu'un liquide emploie pour s'écouler sous une pression constante par un tube capillaire, et on a trouvé ainsi qu'il varie pour chaque solution avec son degré de concentration.

Malgré les nouvelles recherches de M. Wiedemann, dont l'exactitude ne laisse rien à désirer, nous avouerons que nous ne saurions voir dans le transport mécanique des liquides sous

l'influence du courant électrique un effet direct de ce courant. En d'autres termes, la présence du diaphragme poreux nous paraît une condition nécessaire non pas seulement pour manifester, mais bien pour déterminer le phénomène. Il nous semble résulter évidemment des recherches de MM. Van Breda et Logemann que sans le diaphragme il n'y a pas de transport, et rien ne prouve dans les expériences de Wiedemann qu'il en soit autrement. Nous serions donc disposé à voir dans le phénomène du transport un simple phénomène d'endosmose; il est vrai que, pour qu'il y ait endosmose, il faut que les liquides séparés par le diaphragme poreux soient hétérogènes; mais n'est-il pas bien probable que les deux surfaces du liquide électrolytique qui sont séparées par le diaphragme ne sont pas identiques dès que ce liquide transmet un courant électrique; or, comme l'endosmose s'opère par ces surfaces, il suffit qu'elles soient entretenues constamment dans un état d'hétérogénéité pour que l'endosmose ait lieu. En preuve de l'influence toute spéciale du diaphragme sur les deux surfaces du liquide qui sont en contact avec lui, quand du moins ce liquide est traversé par un courant électrique, nous citerons le fait de l'élévation considérable de température qui a lieu dans le liquide des deux côtés du diaphragme, et qui est différente d'un côté de ce qu'elle est de l'autre. Il ne serait pas impossible que cette élévation de température, qui est d'autant plus grande que le liquide est moins conducteur, fût assez intimement liée avec le phénomène lui-même de l'endosmose électrique, soit comme cause, soit du moins comme tenant à la même cause.

Nous aurions encore à citer quelques autres travaux faits récemment sur l'électrolyse, tels que celui de M. Dupré[1], qui a vérifié sur plusieurs sels de cuivre et d'argent la loi de Faraday, complétant ainsi les recherches de M. Soret et de M. Buff[2], tel surtout que celui de M. Magnus[3], qui, à la suite d'un très-grand nombre d'expériences, est conduit à repousser la théo-

[1] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXV, p. 98.
[2] T. II, p. 300 et suiv.
[3] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXII, p. 327.

rie de Daniell, que nous avions admise[1], sur la manière dont s'opère la décomposition électro-chimique des sels. Il ne croit pas que ce soit le métal seul qui se rende à l'électrode négatif pendant que tous les autres éléments du sel se rendent au positif, mais il admet que c'est bien la base du sel, c'est-à-dire l'oxyde lui-même qui se dépose à l'électrode négatif avec l'hydrogène de l'eau, tandis que l'oxygène et l'acide sont dégagés au positif. Quant à l'objection de Daniell qu'il en résulte dans le sel une double décomposition par la même force qui n'en produit qu'une simple dans un voltamètre placé dans le même circuit, il croit qu'il n'est point nécessaire pour y répondre de recourir à l'explication du physicien anglais, mais il est beaucoup plutôt porté à conclure de ses recherches que, pour séparer un corps simple d'une combinaison, il faut toujours employer la même force, soit que ce corps soit combiné avec un seul autre corps simple, de manière à former un composé binaire, soit qu'il soit combiné avec plusieurs autres corps simples, de manière à former un composé salin. M. Magnus estime qu'à l'aide de ce principe il n'est pas difficile de montrer que la loi de Faraday des équivalents électro-chimiques peut s'appliquer non-seulement aux composés binaires, mais aussi aux composés salins et aux autres combinaisons inorganiques; il appuie son opinion sur l'étude qu'il a faite des conditions sous lesquelles a lieu la séparation d'une substance par le courant qui traverse un électrolyte où il s'en trouve plusieurs susceptibles d'être séparées, et il trouve que leur séparation dépend de plusieurs circonstances, telles que la densité du courant, les proportions des différentes substances dans la dissolution, la nature des électrodes et la plus ou moins grande facilité avec laquelle ces différentes substances peuvent être transportées d'une couche à une autre couche, ainsi que des obstacles qu'on peut opposer à ce transport en employant des séparations poreuses ou de toute autre manière. Sans méconnaître tout ce qu'il y a de plausible dans les raisonnements de M. Magnus et l'attention que doivent provoquer chez les

[1] T. II, p. 312.

physiciens les nouveaux faits qu'il décrit, il nous semble qu'aucun de ces faits n'est contraire à la théorie que nous avons donnée de l'électrolyse des dissolutions salines, et nous persistons à croire que cette théorie, indépendamment de l'avantage qu'elle présente de se plier plus naturellement à la loi de Faraday, a encore celui de comprendre dans la même explication la décomposition des sels qui, comme les sels de cuivre, d'argent, ne donnent à l'électrode négatif que le métal lui-même sans hydrogène, et de ceux qui, comme les sels alcalins ou terreux, donnent à cet électrode l'oxyde métallique avec de l'hydrogène.

Si nous n'étions pas obligé de nous restreindre, nous nous arrêterions quelques instants sur des recherches récentes de M. Clausius, relatives à l'étude générale de la transmission de l'électricité à travers les liquides décomposables. Partant de l'idée à laquelle il a été conduit par ses théories sur la chaleur, que les molécules sont constamment en mouvement, il suppose que dans un électrolyte il y a à côté des molécules composées un certain nombre de molécules simples en mouvement, qu'une molécule électro-positive, par exemple, se mouvant dans l'électrolyte, peut arriver dans une position telle que son attraction pour la négative de la molécule composée soit plus grande que ne l'est celle de la molécule électro-positive appartenant à la même molécule par l'électro-négative qui lui est accouplée. Il y aura décomposition, mais alors une molécule électro-positive sera mise en liberté et ira jouer le même rôle vers une autre molécule. Toutes ces décompositions et recompositions se reproduisent constamment au sein d'un électrolyte; et comme elles se compensent, on n'observe aucun changement. Mais si l'on plonge les deux électrodes dans un électrolyte, alors une direction est donnée à ce mouvement, et les molécules positives mises en liberté se transportent en plus grande quantité vers le pôle négatif, et réciproquement; on détermine par là un dégagement soit accumulation de molécules aux deux extrémités. Ainsi, tandis que dans la théorie de Grotthus on attribue à l'électricité la faculté de produire une décomposition, dans celle de Clausius on admet que la décom-

position préexiste et que l'électricité ne fait que lui donner une direction déterminée.

§ 12. Recherches sur la force électromotrice.

Dans un paragraphe consacré à la mesure de la force électromotrice relative de diverses combinaisons voltaïques[1], nous avons fait connaître en détail les procédés divers employés pour cette détermination et les résultats obtenus par ces procédés. Depuis la publication du second volume de ce Traité, de nouvelles recherches ont été faites sur ce sujet, en particulier par M. E. Becquerel[2], qui s'est livré à un travail étendu comprenant la détermination, soit des forces électromotrices provenant de la polarisation des électrodes, soit de celles dues à l'action des dissolutions les unes sur les autres ainsi qu'à l'action des liquides sur les métaux, soit enfin des forces électromotrices des différentes piles, et en particulier des piles à gaz. Parmi les méthodes que nous avons indiquées pour ce genre de recherches, il a adopté celle de Fechner[3], qui consiste à introduire dans le circuit des couples voltaïques une résistance très-grande par rapport à celle de ces couples, de sorte que lorsqu'on les compare on peut regarder leurs résistances totales respectivement comme égales, et admettre par conséquent que leurs forces électromotrices sont entre elles comme les intensités des courants qu'elles produisent. Au lieu du galvanomètre, dont les indications ne sont proportionnelles aux intensités que jusqu'à 20°, M. E. Becquerel a employé la balance électro-magnétique imaginée par son père[4], qui lui a donné des résultats très-exacts. Sans nous arrêter aux précautions nécessaires dans l'usage de cet instrument et indiquées par M. Becquerel, nous nous bornerons à remarquer que la

[1] T. II, p. 721.
[2] *Annales de chimie et de physique* (N. S.), t. XLVIII, p. 257.
[3] T. II, p. 723.
[4] T. I, p. 342 (fig. 139).

résistance que le courant rencontre en parcourant le fil des deux bobines équivaut à celle d'un fil de 312,378 mètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre, ce qui représente une résistance trente-trois mille fois plus grande que celle d'un couple ordinaire de Bunzen ou de Grove à acide nitrique, et remplit par conséquent la condition voulue pour l'emploi de la méthode de Fechner, quoique cependant il nous paraisse que M. Becquerel ne tienne peut-être pas assez compte de l'immense différence qui existe entre la résistance que présentent des couples tels que ceux de Grove et de Bunzen et des couples de même dimension, mais chargés avec de l'eau pure ou d'autres liquides très-peu conducteurs. Quoiqu'il ait établi le rapport qui existe entre la force électromotrice d'un couple thermo-électrique bismuth-cuivre et celles d'un couple de Bunzen et d'un couple de Daniell, rapport qu'il a trouvé très-rapproché de celui qu'avait obtenu M. J. Regnauld [1], il a préféré prendre pour unité de force électromotrice celle qui résulte de l'action de l'eau acidulée par l'acide sulfurique (9 eau, 1 acide) sur du zinc distillé et fondu. De cette manière, son unité était moins éloignée des valeurs des forces électromotrices qu'il avait à déterminer; il pouvait du reste toujours ramener ses résultats à l'unité tirée de la force électromotrice d'un couple thermo-électrique.

La détermination de la force électromotrice résultant de la polarisation des électrodes a beaucoup occupé M. E. Becquerel; nous nous sommes déjà longuement étendu sur ce sujet [2], aussi nous ne nous y arrêterons pas maintenant, d'autant plus que M. E. Becquerel conclut, d'un très-grand nombre d'expériences, qu'il n'est pas possible d'exprimer d'une manière simple les forces électromotrices des métaux recouverts de gaz oxygène ou hydrogène par voie électro-chimique, vu que les effets varient avec l'étendue de la lame de métal, sa nature et l'intensité du courant. Voici toutefois les résultats d'expériences faites avec des lames de platine de $10^{c.car.}$ de surface, plon-

[1] Tome II, page 735.

[2] Tome II, pages 737 et suivantes.

gées dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique au dixième et en opérant avec une pile de 8 à 10 couples de Bunzen :

Force électromotrice du platine	recouvert d'hydrogène,	37,62
Id.	recouvert d'oxygène,	53,56

Cette dernière force électromotrice serait 9,00 si, au lieu de plonger le platine dans l'eau acidulée, on le plonge dans l'acide nitrique ordinaire. Ces forces électromotrices sont exprimées en fractions de l'unité représentée par 100, nombre qui indique de combien de milligrammes il faut charger la balance électro-magnétique pour faire équilibre à la force du courant provenant d'un couple platine et zinc pur dans de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique au dixième. Le chlore ne donne aux métaux qu'une polarisation bien faible, ce qui tient probablement à sa grande solubilité. Quant aux piles à gaz, M. Becquerel, qui les a étudiées, ne croit pas qu'elles soient dans les mêmes conditions que les couples constitués par des lames métalliques polarisées, puisque le gaz hydrogène seul, en contact avec du platine en présence de l'eau acidulée privée d'air ou d'oxygène et dans laquelle plonge une lame de platine, ne peut constituer un couple, tandis qu'une lame de platine, recouverte électro-chimiquement d'hydrogène, a une force électromotrice propre, même dans le vide ; ce qui semblerait indiquer que les gaz transportés par voie électro-chimique dans l'acte de la polarisation sont dans d'autres conditions que ceux qui entourent les lames et qu'on prépare par les procédés chimiques ordinaires. Ne serait-il pas possible que la différence tînt à ce que dans le cas de la pile à gaz, l'hydrogène est en contact avec le liquide plutôt qu'avec la lame de platine, tandis que dans le second c'est la lame métallique qui est recouverte d'une couche mince d'hydrogène qui, dans cet état, est capable de décomposer l'eau sans le secours de l'oxygène dissous. Il nous semblerait donc que la difficulté soulevée par M. E. Becquerel n'est pas si grande qu'il le présume.

L'étude qu'il a faite des forces électromotrices qui résultent de l'action des dissolutions les unes sur les autres, en les séparant par un diaphragme poreux, montre que dans les couples

voltaïques à deux liquides cette action a une influence beaucoup plus grande qu'on ne pourrait le supposer sur la production du courant électrique. Ainsi, par exemple, l'action mutuelle de l'acide nitrique et du persulfure de potassium donne naissance à une force électromotrice de 72,50, la lame de platine placée dans l'acide nitrique prenant l'électricité positive et celle qui est dans le persulfure la négative. Du reste, les forces électromotrices qui résultent de l'action de deux dissolutions l'une sur l'autre, changent avec le degré de concentration et la température des liquides, et constituent la partie éminemment variable de la force électromotrice des couples, surtout de ceux à deux liquides, appelés couples à courant constant.

De toutes les déterminations de forces électromotrices, la plus importante est sans aucun doute celle des forces électromotrices dues à l'action des liquides sur les métaux; il faut, pour l'obtenir, se servir de deux lames métalliques dont l'une soit d'un métal tel que le platine ou l'or, qui ne soit pas attaquable et qui ait une surface assez grande pour que sa polarisation ne soit pas sensible, ce qu'on obtient en opérant rapidement. Le liquide dans lequel on plonge les deux lames exerce naturellement une grande influence sur la force électromotrice du même métal. Avec l'eau chlorée, non-seulement les métaux oxydables ont une force électromotrice assez grande; mais encore le cuivre, l'argent et l'antimoine, qui sont attaqués vivement, donnent un courant énergique; l'or lui-même en donne un. En employant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, on voit que le degré d'acidité a peu d'influence sur la force électromotrice, sauf pour l'argent. Avec une dissolution de potasse caustique, l'ordre des métaux, par rapport aux forces électromotrices, se trouve changé; c'est ce que nous avions remarqué, il y a longtemps, M. Faraday et moi[1]. Il y a deux métaux qui conservent avec tous les liquides employés, sauf avec le sulfure de potassium, les mêmes rapports de force électromotrice; ce sont le zinc et le plomb. M. E. Becquerel insiste

[1] Tome II, pages 603 et suivantes.

sur les changements de sens dans la direction du courant, qui résultent pour un couple composé des deux mêmes métaux, de son immersion dans deux liquides différents ; c'est un point que j'ai déjà traité en détail ; je n'y reviendrai donc pas. Il s'occupe aussi de la force électromotrice des amalgames qu'il trouve tantôt, comme avec le zinc, plus forte, tantôt, comme avec le cadmium, plus faible que celle du métal pur. Enfin parmi tous les couples il est conduit à reconnaître que celui dont la force électromotrice est la plus grande, est le couple qui est formé de l'amalgame de potassium et d'une couche de peroxyde de plomb déposée voltaïquement sur une lame de platine ; sa force électromotrice est exprimée par le nombre 236,78, en appelant toujours 100 celle du couple zinc pur avec l'eau acidulée avec l'acide sulfurique au dixième ; elle est double de celle d'un couple de Bunzen ordinaire.

Après le potassium, le métal qui a donné à M. Becquerel la force électromotrice la plus grande dans une dissolution de potasse caustique, est l'aluminium ; dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, sa force électromotrice est inférieure à celle du zinc, du cadmium, du plomb, de l'étain et du fer, mais supérieure à celle du nickel, du cobalt, du bismuth, de l'antimoine, du cuivre et de l'argent. M. Wheatstone avait trouvé des résultats à peu près semblables à ceux de M. E. Becquerel quant à l'aluminium [1], et M. Hulot a essayé avec succès de l'employer comme élément électro-négatif d'un couple dans lequel le zinc amalgamé est l'élément électro-positif et le liquide de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique au vingtième [2]. Pendant les premières heures, le courant de ce couple s'est trouvé aussi fort que celui d'un couple platine et zinc plongé dans le même liquide ; il suffit, quand la force diminue, de plonger l'aluminium un instant dans l'acide nitrique et de le laver ensuite, pour lui rendre ses propriétés électro-négatives. M. Buff a reconnu que l'aluminium devient positif dans l'acide nitrique, de sorte qu'on peut former un couple avec de l'aluminium plongé, d'une

[1] *Archives des sciences physiques (B. univ.)*, t. XXXIX, p. 350.
[2] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XL, p. 1148.

part, dans l'acide nitrique, et d'autre part, dans l'acide sulfurique étendu ; la force électromotrice de ce couple est les 0,63 de celle d'un couple de Bunzen. Si, au lieu de l'aluminium, on plonge dans l'acide sulfurique étendu un autre métal, on le trouve électro-positif par rapport à l'aluminium qui est dans l'acide nitrique; le platine est le seul qui dans les mêmes conditions soit électro-négatif[1].

Dans une partie de son travail, M. Becquerel s'occupe de la détermination de la force électromotrice des différentes espèces de piles; les résultats qu'il obtient montrent que l'action des dissolutions entre, comme nous l'avons dit, pour une partie notable dans l'effet de chaque couple. En appelant 100 la force électromotrice d'un couple de Grove (zinc amalgamé et eau acidulée, platine et acide nitrique), on trouve 57,67 pour l'expression de celle d'un couple de Daniell (zinc amalgamé et eau acidulée, cuivre et sulfate de cuivre); en substituant à l'eau acidulée par l'acide sulfurique de l'eau salée, dans ce dernier couple, on trouve que sa force électromotrice augmente et va jusqu'à 63,13. M. E. Becquerel a obtenu 32,5 pour celle du couple de M. Doat, dans lequel on a pour métal attaquable le mercure, et pour liquide actif l'iodure de potassium[2]; ce résultat s'accorde avec celui de M. J. Regnauld, qui a trouvé 32,9 au lieu de 32,5 par une méthode toute différente, sa méthode d'opposition[3]. Il a étendu ses recherches à des couples dans lesquels il a remplacé l'iodure de potassium par le bromure et le chlorure de potassium, et le mercure par le zinc et les amalgames de sodium et de potassium. La force électromotrice est avec le zinc plus que double, et avec les deux amal-

[1] M. Buff a également déterminé la conductibilité électrique de l'aluminium. Il a trouvé, en appelant 100 la résistance de l'argent pur, que celle de l'aluminium presque pur, mou et flexible, était 199,63, et que celle de l'aluminium du commerce était 210,92; celle du cuivre pur et mou était 106,46, et celle du fer mou et peu élastique 676,71 (*Archives des sciences phys.* (*B. univ.*), t. XXXVI, p. 57).

[2] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLII, p. 355.

[3] Tome II, page 734, et *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLIII, p. 47.

games à peu près quadruple de ce qu'elle est avec le mercure. Elle est pour chaque métal plus forte avec le bromure et avec le chlorure qu'avec l'iodure, dans le rapport de 100 à 160 environ pour le bromure et de 100 à 180 pour le chlorure. Dans le couple de M. Doat et dans ceux analogues, l'iodure de potassium liquide avec lequel est en contact le mercure ou un autre métal attaquable, est placé dans une auge poreuse; celle-ci plonge elle-même dans une autre solution d'iodure de potassium qui renferme de l'iode dissous, lequel mis en excès à l'état solide sert à maintenir la constance; c'est le charbon qui sert d'élément négatif. Une pile composée des couples de M. Doat n'a besoin d'aucun autre soin que de celui qui consiste à soutirer à l'aide d'un siphon en verre le liquide saturé d'iodure de mercure, iodure qu'on revivifie facilement par la chaleur pour retrouver les éléments primitifs. Toutefois, malgré la facilité qu'on éprouve à régénérer les produits formés par l'action chimique, l'embarras qu'elle occasionne, le prix élevé des matières qu'elle emploie, et surtout sa faible force électromotrice, ne permettront pas à la pile de M. Doat d'être bien usuelle.

§ 13. Transformation de la chaleur électrique en travail mécanique.

Nous avons exposé les recherches diverses qui ont été faites pour établir un rapport entre la chaleur produite directement par une certaine action chimique et celle qui provient de l'électricité qu'engendre cette même action chimique [1]. On sait que M. Favre a démontré, par des expériences suivies et concluantes, le principe que j'avais le premier énoncé à la suite d'une seule expérience, savoir, que dans un circuit la somme des chaleurs dégagées, soit dans la pile, soit dans le conducteur qui unit les pôles de la pile, est constante pour une même quantité d'action chimique. Des recherches récentes ont eu pour objet d'étudier la transformation de la chaleur qui résulte de cette action chimique en travail méca-

[1] Tome II, pages 807 et suivantes.

nique par l'intermédiaire de l'électricité. M. Favre[1] vient de démontrer expérimentalement que le travail mécanique produit par un courant entraîne toujours une dépense de chaleur empruntée à la chaleur totale que dégagent les actions chimiques de la pile. Voici comment il opère : un premier calorimètre renferme la batterie voltaïque, les cinq couples formés de zinc amalgamé et de platine platiné; un second calorimètre reçoit un électromoteur construit par M. Froment dans ce but spécial; pour rendre les hélices des électro-aimants capables de se refroidir plus facilement, on les a composées d'une série de disques conducteurs séparés par des disques isolants très-minces; ces disques, qui présentent à l'extérieur leurs tranches métalliques et qui sont séparés seulement par les minces tranches des disques isolants, communiquent entre eux de manière à établir un enroulement continu de l'une à l'autre des extrémités des bobines; ils sont isolés du cylindre de fer doux qu'ils enveloppent, aussi bien qu'ils le sont les uns des autres. — L'arbre de l'électromoteur sort du calorimètre et communique par une courroie sans fin avec un arbre à tourillons coniques, portant une poulie sur laquelle s'enroule une corde qui soulève un poids. M. Favre a d'abord fait fonctionner la pile seule dans son calorimètre, tout le travail produit par l'action chimique s'effectuant alors dans la pile elle-même; la chaleur dégagée lui en a donné la mesure; il a trouvé 18682 calories pour 1 gramme d'hydrogène dégagé. En faisant ensuite passer le courant à travers les gros fils qui doivent faire communiquer la pile avec l'électromoteur, on s'est assuré que leur résistance peut être négligée; puis en faisant passer le courant dans l'électromoteur, mais sans le mettre en mouvement, on a trouvé pour la chaleur développée dans le calorimètre de la pile, 16448, et pour le calorimètre de l'électromoteur 2219, ce qui donne une somme de 18667, ne différant du travail primitif considéré toujours comme travail moteur que de 15 unités, écart inséparable des expériences de ce genre. On a mis alors l'électromoteur en mouvement, mais sans lui faire soulever de poids; cette série

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 56.

d'expériences a donné pour somme du travail résultant dans les deux calorimètres le nombre 18657. Ainsi le principe de la constance de la chaleur développée dans un circuit peut être considéré comme étendu à celle qui se développe sous les actions extérieures.

Lorsque l'électromoteur a fait monter un poids en produisant un travail de 131 kilogrammètres, la somme des deux quantités de chaleur accusées par les deux calorimètres a été inférieure à la somme primitive de 308 unités; en sorte qu'on doit considérer ces 308 unités comme équivalentes à 131 kilogrammètres de travail moteur.

La question traitée par M. Favre a aussi occupé M. Soret, qui l'a envisagée sous un rapport un peu différent[1]. Il s'est d'abord occupé des variations d'intensité que subit le courant, lorsqu'il produit un travail mécanique. Nous avons déjà exposé les recherches, à cet égard, de M. Jacobi[2]. Nous nous contenterons, en ce qui concerne celles de M. Soret, de remarquer qu'il a pu résumer ses résultats en disant que, quand un courant électrique continu tend à déterminer un mouvement relatif de deux pièces d'un appareil, si les deux pièces se déplacent en cédant à cette action, c'est-à-dire s'il se produit un travail mécanique positif, on observe une diminution d'intensité du courant pendant que ce mouvement s'effectue; et inversément quand on oblige ces deux pièces à prendre un mouvement opposé à celui que les forces électriques tendent à leur donner, c'est-à-dire si le travail mécanique est négatif, on observe une augmentation d'intensité du courant. M. Soret a remarqué que, quand on force la machine mue par l'électricité à prendre un mouvement renversé, on arrive à des conséquences qui ne semblent pas s'accorder avec la théorie des électromoteurs, dans laquelle on ne s'est occupé que du cas où le mouvement de la machine s'effectue dans le sens naturel. Cette divergence provient principalement de ce que le courant n'est pas continu, et

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 301 et 380, et *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXVI, p. 38.

[2] Tome III, page 338.

de ce qu'il en résulte la production de courants d'induction qui dirigés, les uns dans un sens contraire à celui du courant primitif, et les autres dans le même sens, ne se compensent pas, vu que les derniers ne peuvent pas se propager, parce que le circuit est interrompu au moment où ils se développent. De plus, différentes expériences montrent que la variation d'intensité, résultant du déplacement des pièces qui s'attirent, est bien plus faible que celle qui provient de l'inertie magnétique et électrique, quand on emploie des courants discontinus.

Venant à la question même du rapport qui existe entre la chaleur dégagée par le courant et l'action extérieure qu'il exerce, M. Soret a cherché à se rendre compte de quelle manière a lieu la transformation de la chaleur électrique en travail moteur et à déterminer la portion du circuit où elle a lieu. Il a dû présumer qu'elle se produisait à l'endroit même où se développe le travail mécanique. En prenant deux hélices parfaitement semblables et faisant partie d'un même circuit, placées chacune dans un calorimètre, M. Soret a pensé qu'en faisant produire à l'une d'elles seulement un travail quelconque, il trouverait peut-être une différence dans les températures indiquées par les calorimètres. Sans entrer dans le détail de ces expériences, qui ont été faites en prenant les plus grandes précautions pour éviter toute cause d'erreur, nous nous bornerons à dire qu'on a introduit dans l'une des hélices un cylindre de fer doux, que l'établissement et l'interruption du courant aimantait et désaimantait; et, après une première série d'expériences faites de cette manière, on a fait produire à l'une des hélices un travail mécanique qui donnait un mouvement de va-et-vient au cylindre de fer doux. L'ensemble des deux séries d'expériences a démontré que le rapport des effets thermiques des deux hélices ne subissait pas de variation régulière qu'on pût attribuer à la transformation en travail extérieur d'une certaine quantité de chaleur; mais on ne peut pas encore conclure qu'il n'y ait pas un affaiblissement général calorifique dans tout l'ensemble du circuit, y compris la partie agissante. M. Soret serait disposé à croire que, lorsqu'un courant exerce une action extérieure, les choses se passent comme si l'on aug-

mentait la résistance électrique de la partie du circuit qui agit par induction, ce qui détermine une diminution dans la quantité de zinc dissous, et par conséquent dans la chaleur intérieure de la pile, avec cette différence que l'augmentation de l'effet mécanique qui devrait être produite là où la résistance aurait reçu un accroissement, au lieu de se porter sur la partie inductrice du circuit, se porterait sur le corps induit.

M. Leroux, dans un travail sur les machines électro-magnétiques et magnéto-électriques[1], vient de s'occuper des mêmes questions qui ont été l'objet des recherches de M. Soret, et il est arrivé, en même temps que lui, à une idée semblable, savoir, que le mouvement d'une partie d'un circuit (mouvement nécessairement accompagné d'un travail mécanique), vu la discontinuité du courant, fait naître une résistance spéciale qu'il appelle *résistance dynamique*. L'intensité du courant, c'est-à-dire la quantité de travail mise en jeu pendant l'unité de temps, est toujours en raison inverse, toutes choses égales d'ailleurs, de la somme des résistances dynamiques ou statiques. Le travail mis au jour, que ce travail soit extérieur comme dans les machines magnéto-électriques, ou intérieur comme dans les appareils où entrent les éléments de pile, se partage entre les diverses parties du circuit (chacune prise en bloc, c'est-à-dire avec les corps avoisinants) proportionnellement aux résistances dynamiques et statiques de ces parties. Il ne faut pas perdre de vue que les étincelles et les aimantations absorbent une certaine portion du travail; c'est ce qui explique pourquoi, si on compare la chaleur produite dans le circuit total au travail mécanique, on trouve un nombre un peu trop fort pour exprimer l'équivalent mécanique de la chaleur. Il résulte de là que, dans les machines mues par l'électricité, dans lesquelles on veut faire rendre à l'électricité le plus de travail possible, il faut éviter les changements de sens trop fréquents et la production des étincelles.

Ajoutons encore aux recherches que nous venons d'énumérer

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 414.

celles toutes récentes de M. Quintus Icilius [1], sur la détermination du travail produisant l'unité de chaleur, au moyen du courant électrique. En désignant par I l'intensité d'un courant électrique, supposé constant, par V la résistance voltaïque d'un fil parcouru par ce courant, par U la chaleur qui y est développée pendant l'unité de temps, et par A une constante, on sait qu'on a $U = A I I V$, formule dans laquelle $I I V$ n'est autre chose que le travail exécuté par l'électricité mue en vainquant la résistance du fil. En conséquence, on peut l'exprimer par un nombre dont l'unité est l'unité de travail. On y arrive en adoptant les mesures absolues de M. Weber, pour mesurer les quantités électriques. Pour employer ces mesures, il faut fixer l'unité de distance, le millimètre, l'unité de temps, la seconde; l'unité de masse, le milligramme. Cela posé, l'unité de travail sera le travail qu'il faudra employer pour mouvoir une masse = 1 milligramme sur un chemin = 1 millimètre, la masse n'opposant aucune autre résistance que celle de sa propre inertie. Il résulte de là qu'on obtient la chaleur qui est excitée par cette unité de travail, quand on détermine la valeur numérique de la constante A, en désignant par unité de chaleur la quantité de chaleur qu'il faut pour augmenter la température d'un milligramme d'eau d'un degré centigrade. Sans nous arrêter aux expériences faites avec beaucoup de soin par M. Quintus Icilius, pour obtenir U au moyen d'un calorimètre, et pour déterminer I et V par les procédés indiqués par M. Weber, nous nous contenterons de dire qu'il arrive, en prenant la moyenne de 58 expériences faites en trois séries, chaque série présentant des conditions un peu différentes, à trouver 311,7 kilogrammètres pour la quantité de travail que produit l'unité de chaleur; nombre qui n'excède pas les limites qui renferment les nombres trouvés pour cette constante par les physiciens, suivant des méthodes toutes différentes.

M. Clausius et M. Soret lui-même [2] viennent encore de traiter la question de la conversion de la chaleur du courant électrique

[1] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 420.

[2] *Archives des sciences physiques et naturelles*, t. XXXVI, p. 119 et 123.

en travail moteur extérieur; leurs idées nous paraissant se rapprocher beaucoup de celles de MM. Joule et Scoresby, que nous avons fait connaître dans notre paragraphe relatif aux électromoteurs[1].

§ 14. Recherches relatives aux poissons électriques.

Malgré les détails dans lesquels nous sommes entré sur les poissons électriques[2] nous croyons intéressant pour nos lecteurs de leur faire connaître des recherches récentes de M. Kolliker sur la terminaison des nerfs dans l'organe électrique de la torpille, terminaison que n'ont pu apercevoir correctement les physiologistes qui se sont servis surtout de préparations conservées dans des réactifs. M. Kolliker ayant étudié à Nice, dans l'automne de 1856, l'organe électrique sur des poissons tout frais, a réussi à trouver la véritable terminaison des nerfs dont il s'agit[3]. Après avoir formé les ramifications pâles, connues et très-bien figurées par M. Wagner, et regardées jusqu'à présent comme les véritables terminaisons, les nerfs se divisent en des rameaux pâles et très-déliés qui, en s'anastomosant de toutes parts, forment un *réseau nerveux* très-élégant et délicat. Ce réseau dont les fibrilles constituantes ne mesurent pas plus de 0,0015 à 0,0020 d'un millimètre, et dont les mailles offrent la même grandeur, forme à lui seul une membrane nerveuse particulière de 0,0020 à 0,0025 de millimètre d'épaisseur, qui est étendue dans tout l'espace d'une cloison électrique, étant appliquée partout à une membrane homogène contenant des noyaux, qui lui sert de support. Chaque cloison de l'organe électrique, qui est séparée des avoisinantes par un petit espace contenant un fluide clair, est formée de cinq couches; au milieu se trouvent les grandes ramifications nerveuses et les vaisseaux sanguins supportés par un tissu conjonctif homogène, puis viennent des deux côtés les membranes délicates formées par le réseau nerveux décrit, qui sont recouvertes enfin par des

[1] Tome III, page 340.
[2] Tome III, page 61.
[3] *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLIII, p. 792.

membranes homogènes à noyaux, qui ne portent pas de traces d'épithélium du côté de l'espace contenant le fluide. Ces réseaux nerveux sont extrêmement délicats, c'est ce qui fait qu'ils sont détruits par presque tous les réactifs qu'on emploie dans de pareilles observations et qu'ils ne se voient que sur les préparations prises sur l'animal vivant, ou toutes fraîches. M. Kolliker remarque que la densité et la richesse de l'expansion nerveuse terminale ne sont pas insignifiantes pour l'explication des fonctions toutes particulières de l'organe électrique. Il nous paraît en effet que les observations de M. Kolliker sont de nature à donner un appui à l'explication que nous avons donnée de l'action de l'organe électrique[1], et de la part principale qu'ont dans cette action les terminaisons des nerfs qui y aboutissent.

Nous profiterons de l'occasion qui nous amène à nous occuper de nouveau de l'électricité des torpilles pour réparer une omission que nous avions faite en ne parlant pas du travail remarquable qu'avait fait sur ce sujet en 1836 M. le professeur Colladon[2]. Sans nous arrêter aux expériences par lesquelles M. Colladon avait constaté l'état électrique des différents points du corps de la torpille, nous insisterons sur un fait important qu'il avait observé en même temps que M. Matteucci l'observait de son côté, et qui l'avait conduit à une théorie de ces phénomènes bien rapprochée de la véritable.

Ayant mis les deux pointes de platine terminales d'un galvanomètre en contact respectivement avec la partie inférieure et supérieure du corps d'une torpille affaiblie par l'effet de plusieurs excitations, M. Colladon voulut savoir si elle donnerait encore des secousses quand elle serait profondément blessée. Dans ce but il fit d'abord de fortes incisions dans la partie charnue du corps de l'animal, sans obtenir de déviation sensible; puis, enfonçant la pointe d'un canif dans le cervelet de la torpille ainsi mutilée, il vit l'aiguille du galvanomètre pirouetter complétement; il obtint le même résultat en agissant de même sur une autre torpille avec une pointe d'ivoire. Cette expérience

[1] Tome III, page 71.

[2] *Institut* du 26 octobre 1836, p. 150, et *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. III, p. 490.

importante montrait bien l'influence prédominante du système nerveux dans la production de l'électricité de la torpille, influence que les recherches ultérieures ont rendue encore plus évidente en prouvant qu'elle est la source de cette électricité.

§ 15. Nouvelles recherches sur les variations des éléments magnétiques du globe terrestre.

Nous avons fait connaître d'une manière abrégée[1] les nombreux travaux qui ont été faits sur ce sujet intéressant; pour compléter notre résumé, nous devons dire quelques mots d'un travail récent[2] du P. Secchi sur les perturbations extraordinaires ; c'est en se servant des nombreuses observations du général Sabine et en particulier de celles faites à Toronto, qu'il a réussi à trouver les lois auxquelles elles sont soumises. La première de ces lois, lorsqu'il s'agit de la période diurne, est que *les perturbations suivent le temps local et qu'elles affectent simultanément tous les éléments magnétiques;* la seconde, c'est que *la courbe perturbée est la courbe ordinaire, seulement déplacée extérieurement d'une certaine quantité.* Le P. Secchi a construit la courbe ordinaire en prenant pour chaque heure du jour, sur l'axe des abscisses, une longueur égale à la variation de la déclinaison, et en élevant une ordonnée proportionnelle à la variation de l'inclinaison à la même heure; puis c'est en augmentant ou diminuant chaque abscisse et chaque ordonnée correspondante à chaque heure, de l'effet moyen dû à la perturbation, qu'il a obtenu la courbe perturbée dont le contour est à peu près semblable à celui de la première, avec la différence seulement qui résulte d'un déplacement total. La comparaison des deux courbes conduit à une troisième loi, savoir : que *par l'effet des perturbations, la courbe tend toujours plus à devenir symétrique et égale dans les deux lobes.* Cette conséquence inattendue a été vérifiée par le P. Secchi de différentes manières, et il en a conclu que *les périodes sont liées par une loi très-simple, ayant pour base une variation dans la force qui produit les variations périodi-*

[1] Tome III, page 219.

[2] *Archives des sciences physiques* (*B. univ.*), t. XXXV, p. 161.

ques et qui se manifeste dans la variation des divers éléments, d'après la loi géométrique de la décomposition des forces.

Après la période diurne vient la période annuelle, qui peut se résumer en une loi très-simple aussi, c'est que *les perturbations sont en maximum aux équinoxes, et en minimum aux solstices.* M. Wolf a cru reconnaître une relation analogue pour les taches solaires, dont les minima correspondent aux deux époques où la terre passe par le plan contenant l'axe du soleil et une parallèle à l'axe de la terre, c'est-à-dire aux époques des solstices, et les deux maxima aux deux époques où la terre s'éloigne le plus de ce plan, c'est-à-dire aux époques des équinoxes; il a insisté sur la correspondance qui existe entre cette période annuelle des taches solaires et celle des variations du magnétisme terrestre, déduites de la combinaison des variations en déclinaison observée sur l'hémisphère boréal avec celles de l'hémisphère austral, combinaison faite pour éliminer l'influence de la déclinaison du soleil.

Mais c'est dans la période décennale que se trouve surtout une correspondance remarquable entre les variations des taches solaires et un changement des variations magnétiques; c'est ce que nous avons déjà fait remarquer[1]. Annoncée en 1843 par M. Schwabe en ce qui concerne les taches du soleil, et plus tard par M. Lamont pour la déclinaison magnétique, cette période décennale a été constatée en 1852 pour l'un et l'autre des deux phénomènes, d'abord par le général Sabine, et peu de mois après par M. Wolf et par M. Gautier, qui n'avaient pas connaissance de la remarque de M. Sabine. Dès lors ce dernier observateur et M. Hansteen se sont assurés que cette période s'étendait aux variations de tous les éléments magnétiques et même à celles des aurores boréales. M. Wolf, qui a fait des recherches considérables sur les anciennes observations de taches du soleil, est parvenu à la valeur de 11 ans $\frac{1}{9}$ pour la durée moyenne de cette période, valeur qui lui paraît confirmée par l'étude spéciale qu'il a faite des variations magnétiques observées depuis la fin du siècle dernier. Il n'est question ici que d'une quantité moyenne, car M. Wolf a constaté des

[1] Tome III, page 278.

effets de perturbation dus à des causes inconnues encore, qui altèrent quelquefois de quelques années le retour d'un maximum ou d'un minimum de taches, et qui sont analogues à ceux qu'on observe dans les périodes des étoiles fixes d'éclat variable. Plusieurs astronomes, tels que sir John Herschell, MM. Carrington et Wolf, ont déjà remarqué que cette période hélio-magnétique de 11 ans $\frac{1}{9}$ se rapproche beaucoup de la révolution de la planète Jupiter autour du soleil, qui est d'environ 11 ans et 10 mois. M. Wolf a, de plus, émis la supposition qu'elle correspond à la révolution *tropique* de Jupiter, c'est-à-dire relative à ses points équinoxiaux, plutôt qu'à sa révolution *sidérale*, la première de ces révolutions devant être un peu plus petite que la seconde, surtout à cause de l'aplatissement de Jupiter, qui est vingt fois plus grand que celui de la terre. Tout récemment enfin, M. Wolf a annoncé qu'ayant recherché si la planète Vénus n'aurait pas aussi quelque influence sur les taches du soleil, il a trouvé un maximum bien marqué correspondant à l'époque du périhélie de Vénus. Nous avons déjà fait remarquer l'influence magnétique de la lune[1], qui a été mise en évidence avec une rare habileté par le général Sabine pour Toronto, Sainte-Hélène et Hobart-Town. Tous les éléments magnétiques sont influencés par la lune, et on trouve pour les variations lunaires des lois semblables à celles qu'on avait reconnues pour les variations solaires, mais ces variations sont beaucoup plus faibles.

Nous ne suivrons pas le P. Secchi dans l'étude qu'il fait des variations séculaires en vue de démontrer encore dans leur marche l'influence du soleil; nous nous bornerons à ajouter que M. Lamont a trouvé de son côté que la variation séculaire de la déclinaison est assez régulière, et peut être regardée comme une oscillation de longue période; seulement une retardation très-remarquable a eu lieu entre 1855 et 1856. Le même observateur nous communique encore quelques résultats intéressants, savoir que l'intensité horizontale augmente de $\frac{1}{50}$, et l'intensité totale diminue de $\frac{1}{450}$ par an, mais d'une manière irrégulière; c'est probablement ce mouvement irrégulier qui

[1] Tome III, pages 259 et suivantes.

produit les petites irrégularités de la variation séculaire de la déclinaison. M. Lamont, à la suite de nombreux calculs pour découvrir les lois du mouvement diurne des trois éléments, a bien trouvé une grande régularité dans les coefficients des différents mois, mais sans que les nombres suivent aucune loi simple. Il croit avoir démontré que les idées de M. Lloyd, sur la liaison entre la température de l'air et les mouvements magnétiques, ne sont pas fondées; il n'estime pas non plus pouvoir adopter les conséquences que le général Sabine a déduites des observations de Sainte-Hélène à l'égard de l'influence du soleil, et de l'inflexion opposée des courbes, selon que la déclinaison du soleil est australe ou boréale.

§ 16. Procédé de M. Wartmann pour établir une correspondance immédiate entre deux quelconques des stations situées sur une même ligne télégraphique.

Nous avons décrit (p. 400 et 401) les moyens employés pour établir une communication directe entre deux stations télégraphiques éloignées; le plus usité consiste à requérir de toutes les stations intermédiaires qu'elles rompent leur liaison avec la terre; mais outre que ce mode exige un temps assez long, il présente l'inconvénient que la dépêche est reproduite par le relais dans chacune des stations. M. Wartmann a fait connaître en 1853 [1] un procédé qui lui permet d'obtenir avec un seul fil télégraphique tous les avantages qu'on obtiendrait en ayant des fils spéciaux pour unir les stations les unes aux autres. Chaque station doit être munie d'un relais composé de deux électro-aimants fixés des deux côtés d'une armature aimantée à bascule, qui se trouve rappelée contre un butoir au moyen d'un ressort antagoniste. Au-dessous de celle des extrémités de la bascule qui n'est pas reliée au ressort antagoniste, est fixée une lame de ressort disposée de manière à être remontée par cette extrémité; cette lame appuie ordinairement contre une vis reliée métalliquement avec la terre, tandis que la lame elle-même communique avec les fils des deux électro-aimants, qui sont eux-mêmes dans le circuit du fil de ligne.

[1] *Archives des sciences physiques et naturelles (B. univ.)*, t. XXIII, p. 5.

Supposons maintenant trois stations A, B et C; si on télégraphie entre A et B, on emploie un courant d'une intensité suffisante pour vaincre la résistance du circuit à parcourir, mais cette intensité n'est pas suffisante pour faire marcher la lame du relais de M. Wartmann mis dans le circuit en B, à cause de la résistance du ressort qui la retient, laquelle a été calculée en conséquence. Mais si on veut télégraphier de A en C, on emploie un courant plus fort, et cette augmentation doit être telle qu'elle triomphe de la résistance du ressort de la lame aimantée, qui étant attirée par l'électro-aimant fait cesser toute communication du relais avec la terre; en même temps ce mouvement établit la communication directe entre A et C sans que l'intervention d'aucun employé ait été nécessaire. Si la station C possède un appareil analogue à celui de la station B, on pourra, en renforçant encore le courant, pousser jusqu'à une station D la communication directe, et ainsi de suite.

Il faut, pour que toutes ces communications s'effectuent commodément, plusieurs dispositions accessoires, dont la plus importante est de pouvoir par une simple manœuvre introduire dans le circuit le nombre de couples nécessaires pour faire fonctionner par communication directe les appareils télégraphiques de telle ou telle station; c'est ce que M. Wartmann obtient au moyen d'un appareil de son invention, qu'il a nommé *régulateur*. A cet appareil est joint un appareil *indicateur* destiné à indiquer si la station voulue a été atteinte, et par conséquent si le courant lancé a eu une intensité suffisante pour faire jouer les appareils qui doivent fermer le circuit à chaque station intermédiaire. La persistance du magnétisme rémanent dans les électro-aimants fait que le circuit demeure fermé malgré les petites interruptions qu'exige la transmission des signes télégraphiques; et quand on veut obtenir instantanément la rupture du circuit, il suffit d'y lancer un courant inverse de courte durée, courant qui en renversant les pôles des électro-aimants, fait détacher les armatures aimantées qu'une répulsion immédiate ramène dans chaque appareil contre les butoirs d'arrêt.

NOTES

RELATIVES

AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES

DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS[1].

NOTE A (p. 206),

RELATIVE A LA MESURE ABSOLUE DE L'INTENSITÉ DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

Nous donnons dans cette note les développements de la méthode de Gauss, pour la mesure de l'intensité absolue du magnétisme terrestre (*Annales de chimie et de physique*, T. LVII, p. 5). Elle est un exemple intéressant de physique mathématique autant par la généralité avec laquelle l'illustre géomètre a traité la question, que par les résultats pratiques auxquels il a été conduit.

Pour comprendre ce qui va suivre, il est nécessaire de revenir un instant sur les principes fondamentaux de la théorie du magnétisme. Un corps magnétique doit être considéré comme un assemblage de particules dont chacune contient des quantités égales des deux fluides, et c'est la séparation plus ou moins grande, ou en plus ou moins grande quantité de ces deux portions de fluide, qui constitue le magnétisme libre de la particule. L'attraction qui a lieu entre deux quantités données de fluides de noms contraires supposés concentrés chacun en un point, est égale à la répulsion produite par des quantités respectivement égales de fluides de même nom agissant à la même distance. En prenant pour unité la quantité de fluide qui, agissant sur une quantité égale à elle-même et à l'unité de distance, produit l'unité de force accélératrice, l'action d'une quantité m de fluide boréal sur une quantité m' du même fluide, à la distance r, sera exprimée par $\frac{mm'}{r^2}$ (en admettant la loi de la raison inverse du carré de la distance), et la formule sera applicable à tous les cas si l'on convient de donner le signe négatif au fluide austral, et d'entendre par une attraction une force négative.

Concevons un corps magnétique de forme quelconque rapporté à trois axes de coordonnées rectangulaires. Soit dm un élément de magnétisme libre, positif ou négatif, en un point x, y, z; $x\,dm$ est ce qu'on peut appeler le moment de cet élément par rapport à l'axe des x ou au plan des

[1] Ces notes ont été rédigées par M. Lucien de la Rive.

zy; faisons la somme des produits analogues dans toute l'étendue du corps, et posons :

$$\Sigma\, x\, dm = X; \quad \Sigma\, y\, dm = Y; \quad \Sigma\, z\, dm = Z.$$

La valeur du moment magnétique du corps par rapport à un axe ne dépend pas de l'origine des coordonnées; en effet, on a :

$$\Sigma\,(x-a)\,dm = \Sigma\, x\, dm - a\,\Sigma\, dm.$$

Et comme par hypothèse $\Sigma\, dm = 0$, on a :

$$\Sigma\,(x-a)\,dm = \Sigma\, x\, dm.$$

Exprimons le moment magnétique du corps par rapport à un axe faisant avec les axes des coordonnées les angles A, B, C; soit V ce moment.

$V = \Sigma\,(x \cos. A + y \cos. B + z \cos. C)\, dm = X \cos. A + Y \cos. B + Z \cos. C.$

Considérons en particulier l'axe que nous nommerons axe principal, pour lequel on a :

$$\text{Cos. A} = \frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}, \quad \text{Cos. B} = \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}, \quad \text{Cos. C} = \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}.$$

La valeur que prendra V sera :

$$M = \sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$$

et l'expression générale de V pourra se mettre sous la forme :

$$V = M\left\{\frac{X}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} \cos. A + \frac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} \cos. B + \frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}} \cos. C\right\}$$

$$\text{ou } V = M \cos. \omega,$$

en désignant par ω l'angle que fait l'axe pour lequel le moment magnétique est V avec l'axe principal.

Ainsi, l'on obtient le moment magnétique du corps par rapport à un axe quelconque, en multipliant le moment M par le cosinus de l'angle que fait cet axe avec l'axe dont la direction a été établie par les équations ci-dessus; on en conclut que M est le moment magnétique maximum, et que tout moment magnétique relatif à un axe perpendiculaire à l'axe principal est nul.

Pour expliquer l'action du magnétisme terrestre sur une aiguille aimantée, on admet qu'une force d'intensité et de direction constantes (pour une valeur constante du temps) vient agir sur chaque molécule de magnétisme libre; en prenant pour unité la force analogue qui, en agissant sur l'unité de magnétisme, produit l'unité de force, et en désignant par P la force terrestre, $P\,dm$ est l'action élémentaire exercée suivant une direction déterminée et dans un sens dépendant du signe dm. En composant toutes ces forces parallèles, on aura pour la somme des moments, suivant les axes coordonnés :

$$\Sigma\, P x\, dm, \quad \Sigma\, P y\, dm, \quad \Sigma\, P z\, dm, \text{ ou}$$

$$P\,\Sigma\, x\, dm, \quad P\,\Sigma\, y\, dm, \quad P\,\Sigma\, z\, dm;$$

et, d'après le résultat précédemment obtenu, on voit que la résultante de toutes ces actions est un couple dont les deux forces ont leurs points d'ap-

plication sur une droite parallèle à l'axe principal, et que la somme des moments de ces forces par rapport à cet axe est M P.

Cet axe principal est donc *l'axe magnétique* du corps, puisque celui-ci, pour être en équilibre sous l'action du magnétisme terrestre, devra se placer de telle sorte que cet axe coïncide avec la direction de la force terrestre.

Nous allons voir maintenant comment on peut mesurer cette force P, ou plutôt ce qui est plus commode, sa composante horizontale T. Supposons une aiguille aimantée dont l'axe magnétique est horizontal et qui est mobile autour d'un axe vertical, conditions qui seront remplies en la suspendant à un fil par le point où son centre de gravité se trouve transporté par l'action de la composante verticale de la force terrestre; écartons-la de sa position d'équilibre; elle fera pour y revenir une série d'oscillations. Lorsqu'un pendule composé oscille sous l'action de la pesanteur, la formule qui donne le temps d'une oscillation d'amplitude infiniment petite est :

$$t = \pi \sqrt{\frac{\Sigma . m r^2}{p l}},$$

dans laquelle $\Sigma m r^2$ est le moment d'inertie du pendule par rapport à l'axe d'oscillation et $p l$ le moment de rotation maximum de la pesanteur. Cette formule est évidemment applicable au cas qui nous occupe, et il faudra seulement y remplacer le moment de rotation maximum de la pesanteur par celui de la composante horizontale de la force terrestre agissant sur l'aiguille. Or cette action est celle d'un couple, dont le moment statique par rapport à l'axe magnétique est M T; le moment de rotation maximum est donc aussi M T, et l'on aura ainsi :

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{MT}},$$

où K est le moment d'inertie de l'aiguille par rapport à l'axe auquel elle est suspendue; on tire de là :

$$MT = \frac{\pi^2 K}{t^2}.$$

On obtient donc ainsi le produit du moment magnétique de l'aiguille par la composante horizontale de la force terrestre; ce produit est un moment de rotation, c'est-à-dire une force multipliée par un bras de levier, et la formule suppose que les unités choisies pour les longueurs, les temps, les masses et les forces, sont telles que l'unité de force donne à l'unité de masse dans l'unité de temps l'unité de vitesse. Si, après avoir obtenu la valeur du produit M T, on obtient celle du rapport $\frac{M}{T}$, en éliminant M, on aura T; or, ce rapport sera donné par l'observation de la position d'équilibre d'une seconde aiguille placée à la fois sous l'influence de la première et du magnétisme terrestre; mais, avant d'aller plus loin, il

convient d'indiquer comment l'on doit s'y prendre pour tirer de l'observation les différents termes de la formule :

$$MT = \pi^2 \cdot \frac{K}{t^2}.$$

Il faut en effet tenir compte de la torsion du fil qui diminue le temps des oscillations. Supposons l'aiguille en équilibre sous la double action du magnétisme terrestre et de la torsion ; soit u l'angle que fait avec le méridien magnétique un diamètre du fil pris à son extrémité inférieure et parallèle à l'axe magnétique de l'aiguille, et v l'angle que fait aussi avec le méridien le diamètre pris à l'extrémité fixe du fil qui, si celui-ci était sans torsion, serait parallèle au diamètre inférieur que nous avons choisi. Le moment de rotation de la torsion est $\theta\,(v-u)$, θ étant un coefficient constant ; celui de l'action terrestre est $MT \sin. u$; on a donc :

$$MT \sin. u = \theta\,(v-u) \text{ ou à cause de la petitese de } u :$$
$$MT\,u = \theta\,(v-u)$$
$$1 + \frac{MT}{\theta} = \frac{v}{u}.$$

Comme il est difficile d'avoir la valeur exacte des v et des u, il vaut mieux observer des différences, et l'on a :

$$1 + \frac{MT}{\theta} = \frac{v' - v''}{u' - u''}.$$

D'autre part, le temps t d'une observation observé et réduit à une amplitude infiniment petite satisfait à la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{MT + \theta}}.$$

Le temps t' que l'on trouverait, s'il n'y avait pas de torsion, est donné par la formule

$$t' = \pi \sqrt{\frac{K}{MT}};$$

on a donc

$$\frac{t'}{t} = \sqrt{\frac{TM + \theta}{MT}};$$

et en faisant $\frac{MT}{\theta} = n$, nombre qui résulte de l'observation des angles u et v, on a :

$$\frac{t'}{t} = \sqrt{\frac{n+1}{n}}.$$

Si le corps oscillant est une aiguille de figure régulière et de masse homogène, on peut trouver son moment d'inertie par des méthodes connues, mais dans l'appareil de Gauss (*Magnétometre unifilaire*, Voy. T. III, p. 211), l'aiguille est jointe à un système compliqué. Pour déterminer le

moment d'inertie de la masse oscillante, on fixe transversalement à l'aiguille une tige de bois sur laquelle on fait reposer, par des pointes aiguës et à des distances égales du point de suspension, deux poids déterminés.

En désignant par K le moment d'inertie cherché, par m la masse de chacun des deux poids, par r la distance de leurs points d'application au point de suspension, et par C la somme du moment d'inertie de la tige de bois par rapport à l'axe de suspension et des moments des poids par rapport à l'axe vertical de chacun d'eux, le moment d'inertie de tout l'appareil est :

$$K + C + 2mr^2.$$

Si donc t, t' et t'' sont les temps d'oscillation observés et corrigés pour les cas successifs où on ne met pas la tige de bois, où les poids sont à une distance r', et enfin où ils sont à une distance r'', on a les trois équations :

$$MT\,t^2 = \Pi^2 K;$$
$$MT\,t'^2 = \Pi^2 (K + C + 2mr'^2);$$
$$MT\,t''^2 = \Pi^2 (K + C + 2mr''^2);$$

d'où l'on tire M T et K qui, une fois connu, devient une constante de l'appareil. Ajoutons que, pour une plus grande précision, il faut donner à r plusieurs valeurs différentes et déterminer par la méthode des moindres carrés des inconnues auxiliaires qui satisfassent le mieux possible à toutes les équations; puis, comme ces diverses opérations demandent assez de temps, il faut faire osciller simultanément une autre aiguille, de manière à pouvoir ramener les observations successives à la valeur moyenne de l'intensité du magnétisme terrestre pour l'une d'elles.

C'est ainsi que Gauss a obtenu avec le magnétomètre unifilaire, d'après une série d'observations faites le 11 septembre 1832 :

$$TM = 179575250.$$

Il avait pris, pour unité de temps, de longueur et de masse, la seconde, le millimètre et la masse d'un milligramme. D'après ce que nous avons dit, l'unité de force est donc la force qui, agissant pendant une seconde sur la masse d'un milligramme, lui donne une vitesse d'un millimètre par seconde, c'est-à-dire le poids d'un milligramme divisé par la vitesse acquise au bout d'une seconde par un corps tombant dans le vide. Cette vitesse est 9811,03 à Gœttingue. De sorte qu'en prenant pour unité le poids d'un milligramme à Gœttingue :

$$TM = 18302,29.$$

Nous allons voir maintenant comment le rapport de ces deux mêmes quantités peut se tirer avec tout autant d'exactitude que leur produit de la position d'équilibre que prend une seconde aiguille (n° 2) sous la double action du magnétisme terrestre et de l'aiguille que nous avons fait osciller (n° 1). Dans ce qui va suivre, Gauss laisse indéterminée la loi de la varia-

tion des forces magnétiques avec la distance, et ses premières observations ont eu pour objet de la fixer.

Il s'agit d'établir les conditions d'équilibre de l'aiguille (n° 2) mobile autour d'un axe vertical et ayant son axe magnétique horizontal; les forces qui agissent sur elle sont le magnétisme terrestre, l'action de l'aiguille (n° 1) fixe et ayant son axe magnétique dans le même plan horizontal, et enfin la torsion du fil de suspension.

Pour qu'un corps soit en équilibre, d'après le principe des vitesses virtuelles, il suffit que la somme des produits de chacune des forces par le déplacement infiniment petit de son point d'application projeté sur la direction de la force soit nulle, pour tout mouvement compatible avec les liaisons du corps, et, dans ce cas, ce sera pour tout mouvement de rotation autour de l'axe vertical, que nous pouvons considérer comme fixe.

Prenons pour axe des z le fil de suspension, pour axe des x le méridien magnétique, et pour axe des y une perpendiculaire au méridien ; l'origine est en h au milieu de l'épaisseur de l'aiguille.

Exprimons les conditions tirées du principe des vitesses virtuelles : 1° pour les forces provenant du magnétisme terrestre. Soit e un élément de magnétisme libre de l'aiguille (n° 2) dont les coordonnées sont x, y, z, $T\,e\,dx$ est le produit de la force par le déplacement du point d'application projeté sur sa direction. Nous avons donc pour toute l'aiguille le terme :

$$\Sigma\, T\, e\, dx;$$

2° Pour l'action de l'aiguille (n° 1). Soit E un élément de magnétisme libre de l'aiguille (n° 1) qui a pour coordonnées X Y Z.

L'action de E sur e est, en posant :

$$r = \sqrt{(X-x)^2+(Y-y)^2+(Z-z)^2},$$

$\frac{Ee}{r^n}$ (n étant réellement égal à 2).

Le produit voulu est donc :

$$\frac{Ee\,dr}{r^n},$$

et pour l'ensemble des deux aiguilles on a la double somme :

$$\Sigma\Sigma\,\frac{Ee\,dr}{r^n}.$$

3° Pour la torsion on a, d'après ce que nous avons vu, u étant l'angle de l'axe magnétique de l'aiguille en équilibre avec le méridien magnétique, et N l'angle de collimation, le terme $\theta\,(N-u)\,du$.

L'équation d'équilibre est donc :

$$\Sigma\, T\, e\, dx + \Sigma\Sigma\,\frac{Ee\,dr}{r^n} + \theta\,(N-u)\,du = o.$$

Il s'agit maintenant d'exprimer soit x, soit r en fonction de u dans les deux premiers termes; il est plus commode de les intégrer par rapport à x et à r et d'en reprendre plus tard la dérivée par rapport à u.

On aura ainsi :

$$\mathrm{T}\, e\, x \text{ et } \frac{\mathrm{E}e}{(n-1)\, r^{(n-1)}}.$$

Concevons maintenant un système d'axes rectangulaires ayant même origine et même axe des z que le précédent, mais mobile avec l'aiguille dont l'axe magnétique sera l'axe des x'; prenons un système analogue pour l'aiguille (n° 1); leur origine sera en H dans le même plan horizontal que h, et sa position sera déterminée d'une part par la longueur R de la droite h' H, h' étant à son tour déterminé par les coordonnés $\alpha\,\beta$, et de l'autre par l'angle ψ de la droite R avec le méridien magnétique; l'axe des X' de ce système coïncidera avec l'axe magnétique de l'aiguille (n° 1), et sera déterminé par l'angle U qu'il fait avec le méridien magnétique (fig. n° 1). Les angles u, U, ψ sont comptés positivement à l'orient du méridien magnétique.

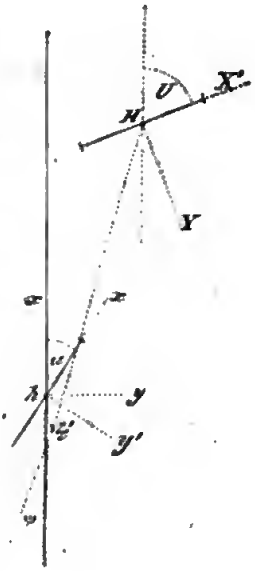


Fig. 1

Pour passer des x aux x' on a les équations :

$$x = x' \cos. u - y' \sin. u\,;$$
$$y = x' \sin. u + y' \cos. u\,;$$
$$z = z'\,;$$

et pour passer des X aux X' on a :

$$\mathrm{X} = \alpha + \mathrm{R} \cos. \psi + \mathrm{X}' \cos. \mathrm{U} - \mathrm{Y}' \sin. \mathrm{U}\,;$$
$$\mathrm{Y} = \beta + \mathrm{R} \sin. \psi + \mathrm{X}' \sin. \mathrm{U} - \mathrm{Y}' \cos. \mathrm{U}\,;$$
$$\mathrm{Z} = \mathrm{Z}'.$$

Remplaçons maintenant x et X par leurs valeurs.

Pour le terme $\Sigma\, \mathrm{T}\, e\, x$, il vient

$$\Sigma\, \mathrm{T}\, e x' \cos. u - \Sigma\, \mathrm{T}\, e\, y' \sin. u.$$

Or, $\Sigma\, \mathrm{T}\, e x' = \mathrm{T}\, m$, en désignant par m le moment magnétique maximum de l'aiguille (n° 2), et $\Sigma\, \mathrm{T}\, e\, y = 0$.

Donc il reste $m\, \mathrm{T} \cos. u$ dont la dérivée, par rapport à u, est : $-m\, \mathrm{T} \sin. u$.

Prenons maintenant le terme $\Sigma\Sigma \dfrac{\mathrm{E}\, e}{(n-1)\, r^{(n-1)}}$; on a :

$$r^2 = (\mathrm{X} - x)^2 + (\mathrm{Y} - y)^2 + (\mathrm{Z} - z)^2.$$

En remplaçant les anciennes coordonnées par leurs valeurs, en effectuant les calculs et en posant pour simplifier :

$$k = \alpha \cos.\psi + \beta \sin.\psi + X \cos.(\psi - U) + Y' \sin.(\psi - U)$$
$$+ x' \cos.(\psi - U) - y' \sin.(\psi - U).$$
$$l = [\alpha \sin.\psi - \beta \cos.\psi + X' \sin.(\psi - U) - Y' \cos.(\psi - U)$$
$$+ x' \sin.(\psi - u) + y' \cos.(\psi - u)]^2 + (Y' - y')^2.$$

On a : $r^2 = (R + k)^2 + l$.

Comme dans les expériences R sera toujours très-grand, $\frac{1}{r^{(n-1)}}$ se développe en une série très-convergente suivant les puissances négatives et croissantes de R.

$$r^{-(n-1)} = \left((R + k)^2 + l\right)^{-\frac{(n-1)}{2}}$$
$$= R^{-(n-1)} - (n-1) k R^{-n} + \left(\frac{(n^2 - n)}{2} k^2 - \frac{(n-1)}{2} l\right) R^{-(n+1)} + \text{etc.}$$

Si nous supposons k et l remplacés par leurs valeurs, on voit que $\Sigma\Sigma \frac{E e}{r^{(n-1)}}$ se compose d'une série de termes dont l'expression générale est :

$$\Sigma\Sigma \frac{E e x'^{\lambda} y'^{\mu} z'^{\nu} X'^{\lambda'} Y'^{\mu'} Z'^{\nu'}}{R^p} = \frac{\Sigma e x^{\lambda} y^{\mu} z^{\nu} \times \Sigma E X'^{\lambda'} Y'^{\mu'} Z'^{\nu'}}{R^p}.$$

Dans le cas le plus général, tout ce qu'on peut établir se réduit aux équations :

$$\Sigma e = o \qquad \Sigma e x' = m \qquad \Sigma e y' = o \qquad \Sigma e Z' = o$$
$$\Sigma E = o \qquad \Sigma E X' = M \qquad \Sigma E Y' = o \qquad \Sigma E Z' = o$$

Dans le cas particulier où la figure de chacune des deux aiguilles ainsi que la distribution de son magnétisme est symétrique, par rapport à l'origine des systèmes d'axes, on a : $\Sigma e x^{\lambda} y^{\mu} z^{\nu} = o$ et $\Sigma E X'^{\lambda'} Y'^{\mu'} Z'^{\nu'} = o$ pour toutes valeurs paires des nombres $(\lambda + \mu + \nu)$ et $(\lambda' + \mu' + \nu')$.

Ainsi dans ce cas si l'on a en même temps $\alpha = o$, et $\beta = o$, les coefficients des termes $R^{-(n+2)} R^{-(n+4)}$, etc., disparaissent. Dans le cas général, ces coefficients seront toujours très-petits, les coefficients des deux premiers termes de la série sont nuls, et le terme principal est :

$$\Sigma\Sigma \frac{E e}{(n-1)} \left\{ \frac{(n^2 - n)}{2} k^2 - \frac{(n-1)}{2} l \right\} R^{-(n+1)}$$
$$= m M R^{-(n+1)} [n \cos.(\psi - U) \cos.(\psi - u) - \sin.(\psi - U) \sin.(\psi - u)]$$

dont la dérivée par rapport à u est :

$$- m M R^{-(n+1)} \left\{ n \cos.(\psi - U) \sin.(\psi - u) - \sin.(\psi - U) \cos.(\psi - u) \right\}.$$

On a donc, pour le développement du terme de l'équation d'équilibre de l'aiguille relatif à l'action de l'autre aiguille, une série de la forme :

$$f\,R^{-(n+1)} + f'\,R^{-(n+2)} + f''\,R^{-(n+3)} + \text{etc.};$$

dans laquelle les coefficients f sont des fonctions rationnelles des sinus et cosinus des angles $(\psi - U)$ et u, et des constantes des deux aiguilles.

On voit de plus que dans le cas particulier de symétrie indiqué plus haut f', f'', etc., sont nuls, que dans le cas général ils sont très-petits et que de plus, si toutes les autres quantités restant les mêmes, ψ est augmenté de 180°, f, f'', etc., gardent les mêmes valeurs et f', f''', etc., changent de signes. L'équation d'équilibre est donc :

$$-m\,T \sin. u + f R^{-(n+1)} + f' R^{-n+2} + \text{etc.} - \theta\,(u - N) = o;$$

comme u et N sont très-petits, on peut remplacer $\theta\,(u - N)$ par

$$\theta \sin. (u - N).$$

Soit u_0 la valeur de u pour laquelle l'aiguille (n° 2) est en équilibre sous l'action du magnétisme terrestre et de la torsion en l'absence de l'aiguille (n° 1), on a :

$$m\,T \sin. u_0 - \theta \sin. (u_0 - N) = 0.$$

A cause de cette égalité, l'équation :

$$m\,T \sin. u + \theta \sin. (u - N) = \left\{ m\,T \cos. u_0 + \theta \cos. (u_0 - N) \right\} \sin. (u - u_0)$$

est une identité, et comme u_0 est à peu près nul, le second nombre peut s'écrire : $(m\,T + \theta) \sin. (u - u_0)$, en sorte que l'équation d'équilibre devient :

$$(m\,T + \theta) \sin. (u - u_0) = f\,R^{-(n+1)} + f'\,R^{-(n+2)} + \text{etc.}$$

Si l'on ne garde que le coefficient f, en remplaçant dans sa valeur l'angle $\psi - u$ par $(\psi - u_0) + (u_0 - u)$, on a :

$$(m\,T + \theta) \sin (u - u_0) =$$
$$M\,m\,R^{-(n+1)} \begin{cases} \cos. (u - u_0) \left\{ n \cos. (\psi - U) \sin. (\psi - u_0) + \sin. (\psi - U) \cos. (\psi - u_0) \right\} \\ \sin. (u - u_0) \left\{ n \cos. (\psi - U) \cos. (\psi - u_0) - \sin. (\psi - U) \sin. (\psi - u_0) \right\} \end{cases}$$

D'où l'on tire :

$$\text{tg.}(u - u_0) = \frac{m\,M \left\{ n \cos. (\psi - U) \sin. (\psi - u_0) + \sin. (\psi - U) \cos. (\psi - u_0) \right\} R^{-(n+1)}}{m\,T + \theta + m\,M \left\{ n \cos. (\psi - U) \cos. (\psi - u_0) - \sin. (\psi - U) \sin. (\psi - u_0) \right\} R^{-(n+1)}}$$

ou en négligeant au dénominateur le facteur de $R^{-(n+1)}$

$$\text{tg.}\,(u - u_0) = \frac{m\,M}{m\,T + \theta} \left\{ n \cos. (\psi - U) \sin. (\psi - u_0) + \sin. (\psi - U) \cos. (\psi - u_0) \right\} R^{-(n+1)}$$
$$= F R^{-(n+1)},$$

où l'on a $F = \dfrac{f}{m\,T + \theta}$ en changeant u en u_0.

Si l'on veut prendre un plus grand nombre de termes, il faut effectuer la division, et en posant pour simplifier :

$$q = m\mathrm{M}\left\{n \cos.(\psi - \mathrm{U})\cos.(\psi - u_0) - \sin.(\psi - \mathrm{U})\sin.(\psi - u_0)\right\}, \text{ on a:}$$

$$\frac{f\mathrm{R}^{-(n+1)} + \text{etc.}\ldots + f_n\mathrm{R}^{-(2n+1)} + f_{(n+1)} - \dfrac{qf}{m\mathrm{T}+\theta}\Big|\mathrm{R}^{-(2n+2)}}{m\mathrm{T}+\theta + q\mathrm{R}^{-(1+n)} + \ldots}$$

$$\frac{f\mathrm{R}^{-(n+1)}}{m\mathrm{T}+\theta} + \frac{f'\mathrm{R}^{-(n+2)}}{m\mathrm{T}+\theta} + \ldots \frac{f_n\mathrm{R}^{-(2n+1)}}{m\mathrm{T}+\theta} + \left\{\frac{f^{n+1}}{m\mathrm{T}+\theta} - \frac{(fq)}{(m\mathrm{T}+\theta)^2}\right\}\mathrm{R}^{-(2n+2)} + \ldots$$

Ainsi on a : $\mathrm{tg}\,(u - u_0) = \mathrm{F}\mathrm{R}^{-(n+1)} + \mathrm{F}'\mathrm{R}^{-(n+2)} + \ldots$

Série dans laquelle les coefficients F proviennent respectivement des termes f, où u est changé en u_0 et cela jusqu'au terme en $\mathrm{R}^{-(2n+1)}$; mais, à partir de là, des termes nouveaux s'introduisent.

Il convient ici de faire une remarque qui nous servira plus tard. Nous savons qu'en changeant le signe de ψ, f', f'', etc., gardent les mêmes valeurs, tandis que f' f''', etc., changent de signe. Or, si n est pair (ce qui est le cas) le coefficient de $\mathrm{R}^{-(2n+2)}$ dans la série de tg. $(u - u_0)$ renferme un coefficient de l'espèce f et un coefficient de l'espèce f'; donc, à partir de ce terme, on n'obtient plus de termes respectivement égaux et des signes contraires, en changeant le signe ψ.

Nous avons donc tg. $(u - u_0) = \mathrm{F}\mathrm{R}^{-(n+1)} + \mathrm{F}\mathrm{R}^{-(n+2)}$, etc.

On voit maintenant que si l'on fait varier R et qu'on observe les angles $(u - u_0)$ on a une série d'équations d'où l'on peut tirer F, et l'on a alors :

$$\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{T}} = \left(1 + \frac{\theta}{m\mathrm{T}}\right)\frac{\mathrm{F}}{n\cos.(\psi - \mathrm{U})\sin.(\psi - u_0) + \sin.(\psi - \mathrm{U})\cos.(\psi - u_0)};$$

$\dfrac{\theta}{m\mathrm{T}}$ sera déterminé comme nous l'avons vu pour l'aiguille (n° 1).

Ainsi théoriquement le problème est résolu, mais au lieu de comparer u et u_0 il vaut mieux comparer entre elles deux déviations opposées u' et u'' obtenues en augmentant U de deux droits, puis faire de nouveau cette double observation après avoir augmenté ψ de deux droits, ce qui donne : u''' et u''''. En effet, d'après la remarque ci-dessus, on a :

$$\mathrm{tg}\,(u' - u_0) = \mathrm{F}\mathrm{R}^{-(n+1)} + \mathrm{F}'\mathrm{R}^{-(n+2)} \ldots + \left\{\frac{f^{(n+1)}}{m\mathrm{T}+\theta} - \frac{f.q}{(m\mathrm{T}+\theta)^2}\right\}\mathrm{R}^{-(2n+2)} + \ldots$$

$$\mathrm{tg.}\,(u''' - u_0) = \mathrm{F}\mathrm{R}^{-(n+1)} - \mathrm{F}'\mathrm{R}^{-(n+2)} \ldots + \left\{\frac{-f^{(n+1)}}{m\mathrm{T}+\theta} - \frac{fq}{(m\mathrm{T}+\theta)^2}\right\}\mathrm{R}^{-(2n+2)} + \ldots$$

Par la série arc. tg. $x = x - \dfrac{x^3}{3} + \ldots$; on voit que le développement de

$u - u$ est le même que celui de tang. $(u - u_0)$ jusqu'au terme en $R^{-(2n+3)}$, donc :

$$(u' - u_0) + (u''' - u_0) = 2 F R^{-(n+1)} + 2 F'' R^{-(n+3)} \ldots - \frac{2 f q R^{-(2n+2)}}{(m T + \theta)}.$$

nous changeons maintenant le signe U, nous aurons :

$$(u'' - u_0) + (u'''' - u_0) = -2 F R^{-(n+1)} + G' R^{-(n+3)} \ldots - \frac{2 f q R^{-(2n+2)}}{(m T + \theta)^2},$$

G' désignant un coefficient quelconque dont nous ne déterminons pas la valeur. Le dernier terme ne change pas de signe, parce que f et q en changent tous deux ; on aura, en retranchant ces deux développements et en divisant par 4 .

$$\frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u'''') = F R^{-(n+1)} + L' R^{-(n+3)} \ldots + L_{\frac{n+2}{2}} R^{-(2n+3)}$$

e par conséquent aussi :

$$\text{tg. } \frac{1}{4}(u' - u'' + u''' - u'''') = F R^{-(n+1)} + L' R^{-(n+3)} \ldots + L_{\frac{n+2}{2}} R^{-(2n+3)}.$$

De sorte que nous obtenons ainsi un développement dans lequel la moitié des coefficients a disparu jusqu'au terme en $R^{-(2n+3)}$.

Il reste à déterminer les valeurs à donner à ψ et à U, qui doivent être telles que les erreurs dans leur mesure influent le moins possible sur la valeur de F ; pour cela, la valeur de U pour une valeur donnée à ψ doit rendre F maximum ; on a ainsi :

$$\text{Cotg. } (\psi - U) = n \text{ tg. } (\psi - u_0) \cos.^2 (\psi - u_0).$$

La valeur donnée à ψ devra rendre cette expression maximum ou minimum, ce qui a lieu :

1° En faisant $(\psi - u_0) = 90^\circ$ ou 270° ; dans ce cas $F = \frac{n m M}{m T + \theta}$;

2° En faisant $(\psi - u_0) = 0$ ou 180°... $F = \frac{m M}{m T + \theta}$.

Il y a donc deux méthodes d'observation (fig. 2) ; dans chacune des positions indiquées par H_1 et H_2, l'aiguille fixe doit prendre deux positions diamétralement opposées.

La première méthode est la plus avantageuse, car elle donne pour F une valeur n fois plus grande, et les erreurs sont par conséquent diminuées dans le rapport de 1 à $\frac{1}{n}$.

Les premières expériences de Gauss ont eu pour objet de déterminer la valeur de n laissé indéterminé dans tous les calculs. Voici le tableau de

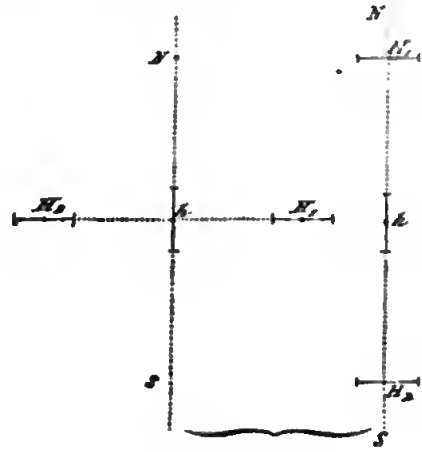


Fig. 2.

ses observations pour lesquelles il a employé simultanément les deux méthodes; dans ce tableau $v = \frac{1}{4}(u' - u'' + u'' - u''')$.

R	v 1re méthode.	v 2e méthode.
1m,3	2° 13′ 51″,2	1° 57′ 24″,8
1, 4	1° 47′ 28″,6	1° 29′ 40″,5
1, 5	1° 27′ 19″,1	1° 10′ 19″,3
1, 6	1° 12′ 7″,6	0° 55′ 58″,9
etc.	etc.	etc.

On voit d'abord que les nombres de la seconde colonne sont à peu près doubles de ceux de la troisième, ce qui montre que n doit être égal à 2.

En donnant à n la valeur 2, Gauss a trouvé pour les coefficients les valeurs suivantes :

$tg.\ v = 0{,}086870\ R^3 - 0{,}002185\ R^5$ pour la première méthode, et le tableau suivant donne les valeurs comparatives des angles v observés et calculés d'après cette formule :

R	Valeurs de v observées.	Valeurs de v calculées.	Différences.
1,3	2° 13′ 51″,2	2° 13′ 50″,4	+0″,8
1,4	1° 47′ 28″,6	1° 47′ 24″,1	+4″,5
1,5	1° 27′ 19″,1	1° 27′ 28″,7	−9″,6
1,6	1° 12′ 7″,6	1° 0′ 14″,9	−3″,3

Il ne peut rester aucun doute sur la valeur de n et la loi des attractions magnétiques se trouve ainsi confirmée. En outre, l'on voit que si l'on ne prend pas des valeurs de R plus petites que 4 fois la longueur des aiguilles (elles avaient 0m,3), deux termes de la série sont suffisants.

Voici maintenant les éléments d'une détermination de la valeur absolue de la force horizontale du magnétisme terrestre :

$$R = 1^m,2 \quad v = 3^\circ, 42' 19'',4 ;$$
$$R' = 1^m,6 \quad v' = 1^\circ, 34' 19'',3 ;$$

On a donc $\text{tg.}\, v = F R^{-3} + L' R^{-5}$ ou $R^3 \text{ tg.}\, v = F R^2 + L'$;
de même. . . . . $R'^3 \text{ tg.}\, v' = F R'^2 + L'$.

$$\text{d'où } F = \frac{R^3 \text{ tg.}\, v - R'^3 \text{ tg.}\, v'}{R^2 - R'^2} = 113056200 ;$$

$$\text{de là } \frac{M}{T} = 56606437.$$

L'on a d'ailleurs $MT = 179770600$,
d'où $T = 1,782088$; et on se rappelle que l'unité est la force qui, en agissant sur l'unité de magnétisme libre, produirait une action égale à l'unité de force.

En résumé, la détermination de l'intensité absolue du magnétisme terrestre se compose de deux opérations bien distinctes; dans la première on détermine le nombre des oscillations que fait une aiguille dans un temps donné ; ce nombre dépend de l'intensité du magnétisme terrestre et de la constitution de l'aiguille, c'est-à-dire du moment statique de ses éléments de magnétisme libre et de son moment d'inertie; comme on peut facilement déterminer ce moment d'inertie, on obtient le moment statique du magnétisme de l'aiguille multiplié par l'intensité du magnétisme terrestre. La seconde opération consiste à observer la position d'équilibre que prend une aiguille soumise à l'action du magnétisme terrestre et à celle de l'aiguille que l'on a fait osciller; cette dernière action dépend de la distribution du magnétisme libre dans les deux aiguilles, de la distance des centres, de la position des axes magnétiques par rapport à la droite qui joint les centres, et enfin de la loi que suivent les attractions et les répulsions magnétiques. Cette loi une fois connue, on trouve que l'action totale de l'aiguille fixe sur l'aiguille mobile tend, à mesure que la distance des centres augmente, à varier en raison inverse du cube de la distance, en sorte que ce moment de rotation pris pour une distance suffisamment grande et multiplié par le cube de la distance peut être considéré comme un produit constant; et ce produit, en plaçant les axes magnétiques des deux aiguilles dans des directions relatives déterminées, est exprimé par le produit des moments statiques du magnétisme des deux aiguilles. Comme d'ailleurs le moment de rotation exercé par le magnétisme terrestre sur l'aiguille mobile est exprimé par le produit du moment statique de l'aiguille et de l'intensité magnétique terrestre, et que la position d'équilibre de l'aiguille nous fait connaître le rapport des deux moments de rotation, on en conclut le rapport des deux quantités dont on a obtenu le produit par la première opération.

NOTE B (p. 231).

RELATIVE AU MAGNÉTOMÈTRE BIFILAIRE.

Cette note a pour objet de montrer comment l'on trouve la valeur du couple que fait naître, sous l'action de la pesanteur, le mode de suspension du barreau aimanté dans le magnétomètre bifilaire et comment l'on en déduit l'intensité du magnétisme terrestre et les variations de cet élément.

Fig. 3.

La figure 3 représente la position d'équilibre qui résulte pour le magnétomètre de l'action de la pesanteur seule, c'est-à-dire celle qu'il prendra si l'on suppose le barreau dépourvu de magnétisme ; nous admettons que les deux points d'attache supérieurs des fils A et B sont sur une même horizontale et que les points d'attache inférieurs *a* et *b* sont situés tous les deux à la même distance du centre de gravité *c* du barreau. Pour qu'il y ait équilibre, il faut que les deux fils viennent se couper sur la verticale, passant par le centre de gravité, de telle sorte que le poids du barreau, transporté en ce point d'intersection, se décompose en deux forces dirigées suivant le prolongement des fils, ce qui exige que ces fils soient dans un même plan vertical et qu'ils soient symétriquement placés, de part et d'autre, de la verticale du point *o*, c'est-à-dire que cette verticale coupe par le milieu les lignes A B et *a b*.

Concevons qu'un couple horizontal vienne à agir sur l'aiguille ; il se produira un mouvement de torsion du système suspenseur et les fils cesseront de se trouver dans un plan vertical ; en même temps le point *c*, milieu de *a b*, remontera d'une fort petite quantité le long de la verticale.

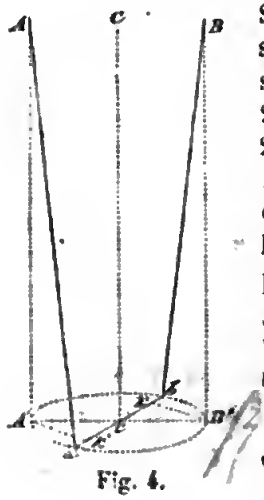


Fig. 4.

Supposons maintenant le système en équilibre sous l'influence de toutes les forces qui agissent sur lui, et soient α l'angle dont a tourné l'aiguille, 2Δ la longueur A B espacement supérieur des fils, 2δ la longueur *a b* espacement inférieur des fils, P le poids du barreau, T la tension commune de chacun des fils, L leur longueur et *l* cette même longueur projetée sur la verticale. Menons par le point *c* la ligne A′B′ égale et parallèle à A C B ; joignons A A′ et B B′ ; A A′ B B′ sera un rectangle vertical et les lignes A B′ et *a c b* seront dans un même plan horizontal (Fig. 4).

Le poids P peut se décomposer en deux forces égales à $\frac{P}{2}$ appliquées en *a* et *b*, la tension T, di-

rigée suivant a A, se décompose suivant la verticale en une force qui a pour valeur T cos. A' A a, c'est-à-dire $\frac{Tl}{L}$. Or le système étant un équilibre, la résultante des forces appliquées en a doit être nulle. La projection de cette résultante sur la verticale doit être nulle aussi, et par conséquent on a :

$$\frac{Tl}{L} = \frac{P}{2}.$$

Du point A' abaissons une perpendiculaire A'k' sur acb; la composante horizontale de la tension qui agit suivant aA' peut se décomposer elle-même suivant ak' et k'A'; il en est exactement de même en b, en sorte que nous aurons deux forces égales dirigées suivant ak' et bk qui se détruiront, et deux autres dont la direction est perpendiculaire à celle de l'aiguille qui constituent un couple faisant équilibre au couple du magnétisme terrestre.

La composante horizontale de la tension a pour valeur :

$$T \cos. AaA' = T\frac{Aa}{L}.$$

L'expression de la composante perpendiculaire à l'aiguille est donc :

$$T\frac{A'a}{L} \times \cos. k'A'a = T\frac{A'a}{L} \times \frac{A'k'}{A'a};$$

$$\text{ou } T \times \frac{A'k'}{L}.$$

En nommant K la valeur du couple bifilaire horizontal qui tend à ramener l'aiguille à sa position d'équilibre, on aura donc :

$$K = 2T \times \frac{A'k'}{L} \times ac = 2\Delta\delta \sin. \alpha \frac{T}{L}.$$

Et en remplaçant T par sa valeur tirée de l'équation qui égale les composantes verticales, on a : $K = \frac{\Delta\delta P \sin. \alpha}{l}$, équation à laquelle il faut joindre l'équation de condition

$$l^2 = L^2 + \Delta^2 - \delta^2 - 2\Delta\delta \cos. \alpha.$$

En général Δ et δ sont si petits par rapport à L qu'on peut sans erreur supposer $l = L$, et nous ajouterons que la torsion propre à chaque fil introduit aussi deux petits couples obliques, mais tellement faibles qu'on peut négliger leur action.

Parmi toutes les positions que peut prendre le barreau sous l'action combinée des deux couples magnétique et bifilaire, il en est une particulièrement intéressante au point de vue des observations, qui est celle pour laquelle l'axe magnétique de l'aiguille est normal au méridien magnétique. On voit, en effet, que pour cette position toutes les forces magnétiques perturbatrices qui altèrent la déclinaison sans modifier l'intensité horizontale, laisseront le barreau magnétique immobile, puisque les composantes

de chaque couple perturbateur sont appliquées en sens directement contraires l'un à l'autre aux deux extrémités de l'axe magnétique; au contraire, les forces qui altèrent l'intensité horizontale auront leur entier effet et manifesteront leur action par des déplacements angulaires du barreau autour de l'axe C O.

Concevons donc que par des tâtonnements, c'est-à-dire en faisant varier peu à peu la position d'équilibre dépendant du mode de suspension seul, on ait amené l'aiguille dans la position indiquée, le moment du couple magnétique est maximum et, en le désignant par M, on a:

$$M = \frac{\Delta \delta P \sin. \alpha}{l} \quad \text{ou} \quad \frac{d^2 P \sin. \alpha}{L};$$

en désignant par d l'espacement des fils lorsqu'on les suppose parallèles et en remplaçant l par L qui en diffère très-peu, comme nous l'avons vu.

On voit donc que la mesure directe des différentes quantités qui entrent dans cette expression permettra de trouver la valeur du couple magnétique tout aussi bien qu'en observant la durée d'un certain nombre d'oscillations, et comme la méthode qui sert à la mesure des angles dans le magnétomètre comporte une très-grande précision et qu'on peut obtenir aussi les autres éléments de la formule avec toute la rigueur désirable, il s'ensuit qu'on arrive ainsi à une valeur très-approchée de la force directrice qui agit sur le barreau aimanté.

Nous allons voir maintenant comment l'on se sert du magnétomètre bifilaire pour observer les variations de l'intensité horizontale. Le moment M est le produit du magnétisme propre du barreau que nous supposons invariable par l'intensité horizontale variable du magnétisme terrestre. Lorsqu'en vertu de cette variation M varie, l'angle α varie aussi; on a donc :

$$d M = \Delta \delta P \left\{ \frac{\cos. d \alpha}{l} - \frac{\sin. \alpha \, dl}{l^2} \right\}.$$

L'équation de condition dont nous avons parlé plus haut donne :

$d l = \frac{\Delta \delta \sin. \alpha \, d \alpha}{l}$, de sorte qu'en remplaçant $d l$ par sa valeur, on trouve:

$$d M = \Delta \delta P \left\{ \frac{\cos. \alpha \, d \alpha}{l} - \frac{\Delta \delta. \sin.^2 \alpha. d \alpha}{l^2} \right\},$$

et, en divisant par M, $\frac{d M}{M} = \left\{ \text{cotg.} \alpha + \frac{\Delta \delta \sin. \alpha}{l^3} \right\} d \alpha.$

Si l'on néglige la petite fraction $\frac{\Delta \delta}{l^2}$

$$\frac{d M}{M} = \text{cotg.} \alpha \, d \alpha.$$

Enfin, il est toujours possible d'établir les conditions d'équilibre de telle sorte que pour la valeur moyenne de M, on ait : $\alpha = 45°$, soit en modifiant les longueurs Δ, δ, soit en faisant varier la longueur des fils, soit encore en ajoutant des poids au barreau ; de cette manière l'équation précédente devient : $\frac{dM}{M} = d\alpha$.

Nous avons dit comment l'on observe avec une échelle horizontale un miroir et une lunette les déplacements angulaires du barreau. Si D est la distance exprimée en millimètres qui sépare le miroir de l'échelle, et par conséquent aussi le miroir de la lunette, une lecture de n millimètres dans la lunette correspondra à une valeur de $d\alpha$ égale à $\frac{n}{2D}$. Or, comme on a $\frac{dM}{M} = d\alpha$, il en résulte $\frac{dM}{M} = \frac{n}{2D}$, et on a ainsi la fraction dont on a changé l'intensité horizontale magnétique, sa valeur moyenne étant prise comme unité.

NOTE C (p. 257),

RELATIVE A LA DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS MAGNÉTIQUES DES PRINCIPALES STATIONS DU GLOBE TERRESTRE.

Nous donnons dans cette note tous les renseignements que nous avons pu recueillir, grâce à l'empressement obligeant avec lequel ils nous ont été communiqués.

Nous avons déjà eu l'occasion de citer les observations magnétiques qui se font à Paris avec une précision remarquable sous la direction de M. Liais. En 1855, MM. Goujon et Liais ont déterminé l'influence locale pour les différentes salles de l'Observatoire où se font des observations magnétiques. Dans ce but, ils ont choisi quatre stations circonvoisines qui étaient Montrouge, la plaine St-Denis, Vincennes et St-Cloud, et ils ont observé dans chacune la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité magnétique. On a pu conclure de la valeur de ces éléments celle qu'ils devaient avoir à l'Observatoire, et en comparant cette valeur avec celles réellement observées, on a déterminé les erreurs locales.

STATION.	DATE.	DÉCLINAISON.	INCLINAISON.	Intensité horiz. Valeur absolue. Unités de Gauss.
OBSERVATOIRE DE PARIS.	1854	20° 1' 55"	66° 25' 3	»
Lat. 48° 50' 13".	1855	19 57 45	66 22 5	»
Longitude de Greenwich. 2° 20' 24" E.	1856	19 48 23	66 19 2	1,8882

M. Plantamour, directeur de l'Observatoire de Genève, nous a communiqué les résultats des observations magnétiques les plus récentes :

STATION.	DÉCLINAISON.	DATES.	INCLINAISON.	DATES.
Genève. . . . . Lat. 46° 11' 59"	18° 59',76	1846,0	64° 40',5	1855,34
Long. au mérid. de Paris. 3° 49' O.	17° 54',49	1853,0	63° 59',65	1842,32

A l'Observatoire de Greenwich, la moyenne de toutes les observations faites pendant l'année 1856 donne pour les éléments du magnétisme terrestre les valeurs suivantes :

GREENWICH.
Lat. . . . . 51° 28' 39".
Long. de Paris. 2 20 24 O.

Déclinaison. . . . 21° 42' 52.
Inclinaison. . . . 68 31
Intensité horizontale. . . 3,822.
Valeur absolue.
Unités anglaises.

Les unités dont on s'est servi à Greenwich pour la mesure de l'intensité sont le pied et le grain anglais, au lieu du millimètre et du milligramme comme à Paris.

M. Quetelet, directeur de l'Observatoire de Bruxelles, publie chaque année le résultat d'un grand nombre d'observations magnétiques faites, soit à Bruxelles sous sa direction, soit par divers observateurs qui les lui communiquent. Nous extrayons de ses notices les tableaux suivants :

STATION.	DATES.	DÉCLINAISON.	INCLINAISON.
BRUXELLES.	1852	20° 18' 2	67° 48' 6
Latitude. . . . . 50° 51' 11".	1853	20 6, 0	67 47, 6
Long. de Paris. . 2 1 46 E.	1854	19 57, 7	67 45, 0
	1855	19 57, 5	67 43, 0

La moyenne des valeurs obtenues pour l'intensité de la force horizontale à Bruxelles de 1828 à 43 est 0,963 en prenant pour celle de Paris 1,000.

Eléments magnétiques pour la date 1853, 66, déterminés par M. A. Ermann.

STATIONS.	LATITUDE.	Long. à l'E. de Paris.	INCLINAISON.	DÉCLINAISON.	Intensité horiz. Valeur absol.
Berlin. . .	52° 31' 5 5"	11° 3' 11"	67° 29' 72"	14° 57' 3"	1,7900
Paris. . .	48 50 16	0	66 25 29	20 17 51	1,8503
Marseille .	43 18 10	356 58 0	61 57 47	17 35 35	2,1026
Carthagène .	37 35 42	356 40 30	57 55 74	18 53 20	2,3251
Malaga . .	36 43 15	353 14 34	58 19 16	20 11 41	2,3436
Santander	48 29 57	351 27 22	63 38 39	21 13 34	2,0493
Nantes . .	47 13 18	356 6 44	66 2 95	21 28 57	1,9360

Les unités qui mesurent les intensités sont les unités de Gauss.

Observations magnétiques dans le nord de l'Allemagne et en Hollande, par M. E. Quetelet, réduites au 1er janvier 1856.

STATIONS.	LATITUDE.	Longitude au méridien de Paris.	INCLINAISON.	Intensité horizont. rapportée à celle d'Altona.
Bruxelles.	50° 51' 11"	2° 51' 46" O.	61° 31' 6	1,034
Cologne.	50 56 29	4 37 30 E.	67 11,9	1,049
Bonn.	50 43 45	4 45 45 E.	67 2,6	1,058
Gotha.	50 57	8 23 E.	66 48,6	1,051
Gœttingue. . . .	51 32	7 14 E.	67 9,1	1,033
Berlin.	52 31	10 41 46 E.	67 27,4	1,029
Altona.	53 32 46	7 36 30 E.	68 27,2	1,000
Amsterdam. . . .	52 22 30	2 32 54 E.	68 14,9	1,014
Rotterdam. . . .	51 55 19	2 8 59 E.	68 4,6	1,008

Une communication de M. Lamont nous donne les résultats des observations les plus récentes faites à Munich :

STATION.	DATES.	DÉCLINAISON MOYENNE.	INTENSITÉ HORIZONT. MOYENNE.
Munich.	1854	13° 19' 45	1,9615
Lat. 48° 8' 45"	1855	15 11 72	1,9598
Longitude de Paris :	1856	15 5 41	1,9680
9° 16' 15" E.	1857	14 57 86	

Observations magnétiques faites en Angleterre, en Hollande, en Belgique et en France, par M. Mahmoud, directeur de l'Observatoire du Caire, réduites au 1er janvier 1856.

STATIONS.	LATITUDE.	Long. au mer. de Paris.	INCLINAISON.	Intensité horizont.	Valeur absolue, totale.
Édimbourg. . .	55° 57′ 20″	5° 41′ 7″ O.	71° 20′ 5	1,601	5,004
Manchester. . .	53 29 0	4 34 46	69 57,7	1,633	4,912
Liverpool. . . .	53 24 40	5 19 19	70 1,0	1,683	4,925
Dublin.	53 23 14	8 41 52	70 25,4	1,671	4,975
Cambridge. . .	52 12 50	2 14 31	68 55,3	1,729	4,808
Oxford.	51 45 38	3 35 54	68 50,3	1,737	4,812
Kew.	52 38 16	2 38 0	68 33,0	1,754	4,798
Greenwich. . .	51 28 39	2 20 24	68 31,2	1,756	4,795
Leyde. . . . ,	51 9 23	2 9 23 E.	68 19,3	1,767	4,784
Amsterdam. . .	52 22 30	2 32 54	68 24,9	1,763	4,792
La Haye. . . .	52 4 20	1 58 16	68 18,8	1,768	4,786
Rotterdam. . .	51 55 19	2 8 59	68 12,3	1,773	4,775
Bruxelles. . . .	50 51 11	2 1 46	67 39,8	1,801	4,739
Calais.	50 57 33	0 29 0 O.	67 59,5	1,782	4,755
Dieppe.	49 55 35	1 15 81	67 22,5	1,825	4,744
Rouen.	49 26 29	1 14 32	67 4,0	1,843	4,730
Saint-Germain.	48 64 37	0 14 43	66 31,5	1,882	4,724
Enghien. . . .	48 57 58	0 2 9	66 32,0	1,884	4,734
Versailles. . . .	48 47 50	0 10 8	66 26,1	1,888	4,722
Paris.	48 50 13	0 0 0	66 21,8	1,889	4,722

Observations magnétiques faites en Espagne, communiquées par M. Manuel Rice Senobas.

STATIONS.	LATITUDE.	Long. au mér. de Paris.	DÉCLINAISON.	INCLINAISON.	DATES.
Madrid.	40 25	6° 2′ 0″	22° 22′ 27″	61° 18′	1855
Lisbonne.	38 42	11 28 45	22 23	60 50,2	1853
Vigo.	42 14	11 4 45		63 21,3	»
Ferrol.	43 29	10 33 15		63 38	»
Varès..	43 41	10 3 15		64 23,9	»
Pasages.	43 20	4 6 15		62 55,9	»

M. Rice Senobas vient de nous communiquer le résultat d'observations récentes faites à Lisbonne.

Déclinaison observée, le 22 juillet 1857, par M. Lamont : 21° 14′ 18″

Inclinaison id. par M. Peyrado : 60 49 48

Une communication de M. Buys Ballot nous donne la valeur des deux mêmes éléments magnétiques pour Utrecht, à la date du 26 août 1857.

Déclinaison : 18° 56′
Inclinaison : 68 4,5.

En Autriche, un grand nombre de stations placées sous la direction de M. Kreil forment un système très-complet d'observations magnétiques. Le tableau suivant présente les éléments magnétiques en quelques-uns de ces points; leurs valeurs sont réduites au 1er janvier 1850, date la plus récente pour laquelle on les ait calculées.

STATIONS.	LATITUDE.	Longitude au merid. de Paris.	DÉCLINAISON.	INCLINAISON.	Intens. totale. Valeur absolue. Unit. de Gauss.
Padoue.	45° 24′	9° 32	15° 0′8	62° 50′	4,542
Venise.	45 26	9 59	15 1,1	62 43	4,526
Salzbourg. . . .	47 48	10 39	15 16,6	64 34	4,567
Ancône.	43 31	11 9	14 8,4	60 57	4.467
Trieste.	45 39	11 25	14 28,2	62 39	4,528
Laybach.	46 3	12 12	13 58,5	62 51	4,534
Gratz.	47 4	13 8	13 49,2	63 27	4,556
Vienne.	48 13	14 2	13 31,1	64 20	4.590
Raguse.	42 38	15 47	12 17,8	59 27	4,451
Ofen.	47 29	16 43	12 18,6	63 13	4,537
Temeswar. . . .	45 25	18 52	10 50,0	61 39	4,493

En Russie, les seules observations récentes sont celles des observatoires magnétiques placés sous la direction de M. Kupffer.

STATIONS.	LATITUDE.	Longitude au meridien de Paris.	DÉCLINAISON	INCLINAISON.	Intensité horiz. Valeur absolue. Unités de Gauss	DATES
Pétersbourg.	59° 57′	27° 59′	6° 26′	70° 59′	1,652	1841
			5 50			1850
				70 49		1851
Cathérinbourg.	56 30	38 14	7 44			1856
				70 5,1		1851
					1,850	1841
Barnaoul . .	39 54	»	8 54			1856
				68 55		1851
					2,061	1841
Nertchinsk .	»	»	4 10			1856
				67 23,1		1851
					2,212	1841
Péking . . . Mission russe	39 54	114 0	»	56 4,3		1851

Nous avons déjà eu l'occasion de citer plusieurs fois les observations

magnétiques du colonel Sabine. Nous donnons dans le tableau suivant les éléments magnétiques pour les quatre principales stations.

STATIONS.	Longit. au mer. de Greenwich.	LATITUDE.	DÉCLINAISON	INCLINAISON.	INTENSITÉ horiz.	DATES moyennes.
Toronto. .	79° 21′ O.	45° 39′ N.	1° 33′ O.	75° 15	3,54	de 1845 à 7
Hobarton.	147 27 E.	42 45 S.	9 57 E.	—70 34	4,51	de 1843 à 8
Le Cap. .	18 29 E.	33 55 S.	29 7 O.	—53 25	4,46	de 1841 à 6
Ste-Hélène	5 40 O.	15 36 S.	23 51 O.	—22 70	5,57	de 1844 à 7

La valeur absolue de l'intensité horizontale est exprimée au moyen des unités anglaises. Dans la colonne des inclinaisons, le signe — indique que c'est le pôle sud de l'aiguille qui plonge au-dessous de l'horizon.

Dans les Indes, un service spécial, *Magnetic survey*, a été organisé pour les observations magnétiques; voici le résultat de celles qui ont été faites de janvier à mai 1856 par M. Hermann Schlagintweit.

STATIONS.	DÉCLINAISON.	INCLINAISON.	DATES.
Débrooghur. .	2° 8′ E.	38° 29′ 17″	Février 1856.
Tezpore . . .	1 59 E.	37 14 58	Janvier.
Odulgoorie. .	2 5 E.	26 27 52	»
Calcutta . . .	2 24 E.	28 6 4	Mars.
Benares. . . .	1 27 E.	32 40 9	Avril.
Lucknow. . .	1 12 E.	35 18 20	»
Agra.	1 14 E.		»

NOTE D (p. 339),

RELATIVE AUX ÉLECTROMOTEURS.

Nous avons donné, en parlant des électromoteurs, les principaux résultats de la théorie de M. Jacobi; ces résultats paraissaient remarquables par leur généralité et en même temps par leur simplicité; mais les expériences nombreuses faites depuis quelques années sur les machines électromotrices, et en particulier les observations récentes de M. Soret qu'il a bien voulu nous communiquer, montrent que, dans la plupart des cas, les formules de M Jacobi ne s'accordent pas avec les faits. Cette théorie des électromoteurs n'en reste pas moins très-utile à connaître, car elle servira toujours de point de départ dans ce genre de recherches, et le défaut de concordance que l'on signale entre les résultats auxquels elle conduit et ceux de l'observation indiquent seulement qu'elle est incomplète. Nous en donnons donc ici le résumé tiré d'un mémoire de M. Jacobi. (*Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XXXIV, p. 451.)

Soit une machine électromotrice de forme quelconque, dans laquelle un courant circule, mais que l'on maintient au repos. Si l'on désigne par k la force électromotrice d'un couple de la pile qui fonctionne, par n le nombre de couples, par ρ la résistance totale du circuit et par I l'intensité du courant, on aura évidemment la relation $I = \frac{n\,k}{\rho}$.

On fait marcher l'appareil, le mouvement commence par s'accélérer en même temps que l'intensité du courant diminue, affaiblissement que l'auteur attribue uniquement aux courants d'induction développés par le mouvement dans les hélices des électro-aimants; après un certain temps on voit l'aiguille d'un galvanomètre introduit dans le circuit, s'arrêter et le mouvement devenir uniforme. C'est qu'à ce moment l'intensité i du courant est telle que les actions magnétiques font équilibre aux résistances qui agissent sur la machine.

Le magnétisme m d'un électro-aimant est proportionnel à l'intensité i du courant et au nombre β des tours de l'hélice, de sorte que l'on a $m = \beta i$.

Or, à cause de l'état d'équilibre où se trouvent toutes les forces agissant sur la partie mobile de la machine électromotrice, la résultante des résistances R est égale à la résultante moyenne des forces magnétiques qui ont pour facteur le carré du magnétisme constant développé dans les électro-aimants et les fers doux. Ainsi l'on a $R = \beta^2 i^2$, si l'on ne tient pas compte d'un facteur indépendant de l'intensité du courant, c'est-à-dire que la résultante des résistances qui agissent sur un électromoteur en mouvement est proportionnelle au carré de l'intensité du courant qui y circule.

La vitesse v dont l'appareil est animé est, elle aussi, une fonction de cette même intensité : en effet, en désignant par i' l'intensité du contre-courant, on a : $i = I - i'$.

D'autre part, la force électromotrice d'un courant d'induction développé dans l'hélice d'un électro-aimant, sous l'influence du mouvement d'un autre électro-aimant ou d'un fer doux, est proportionnelle au magnétisme m de ce dernier, au nombre β des tours de l'hélice et à la vitesse relative, c'est-à-dire à la vitesse v de l'appareil. En outre, la qualité des noyaux du fer doux, leur forme, leurs dimensions et en général la disposition des parties mobiles de la machine par rapport aux fixes, ont sur l'intensité du courant d'induction une influence que M. Jacobi exprime par un coefficient x constant pour le même appareil. D'après ce que nous venons de dire, en se rappelant que ρ est la résistance totale du circuit dans lequel circule aussi le courant d'induction, on a :

$$i' = x\,\frac{\beta^2 i\,v}{\rho}, \quad \text{ou, en remplaçant } i' \text{ par sa valeur } I - i,$$

$$v = \rho\,\frac{(I - i)}{x\,\beta^2 i}.$$

Les deux éléments du travail qu'effectue l'électromoteur, et dont l'expression est $R\,v$, se trouvent ainsi exprimés en fonction de l'intensité i. Si la résistance extérieure vient à changer, après quelques instants d'un

mouvement accéléré ou retardé pendant lesquels l'intensité du courant varie en sens inverse, la vitesse redevient constante en même temps que l'intensité du courant, et les éléments de la nouvelle valeur du travail R′ et v' sont liés à la nouvelle valeur de l'intensité i' de la même manière que R et v l'étaient à i. On a donc pour l'expression générale du travail, dans tous les cas de mouvement uniforme que la machine peut présenter :

$$T = R\,v = \beta^2 i^2 \times \rho \frac{(1-i)}{x\,\beta^2 i} = \rho \frac{(1-i)}{x}\, i.$$

C'est la relation qui existe dans tout électromoteur qui fonctionne d'une manière régulière entre le travail, c'est-à-dire l'effet utile, et l'intensité du courant, c'est-à-dire la dépense.

Il est facile de voir que la valeur de i qui rend T maximum est $\frac{1}{2}$, ce qui donne $T_0 = \frac{\rho\, I^2}{4\,x}$, ou en remplaçant I par sa valeur, $T_0 = \frac{n^2 k^2}{4\,\rho\, x}$, et en reportant cette même valeur dans les expressions de R et de v :

$$R_0 = \frac{\beta^2 n^2 k^2}{4\,\rho^2}; \text{ et } v_0 = \frac{\rho}{x\,\beta^2}.$$

Nous ne reviendrons pas sur ce que nous avons dit (t. III, p. 339) de la valeur de T_0 qui est indépendante de β, tandis que R_0 et v_0 en dépendent.

Quand une pile fonctionne, on sait que la dépense est proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre des couples, en sorte que l'on a pour l'expression de la dépense correspondant aux cas du travail maximum : $Q_0 = n\, i_0 = \frac{n^2\, k}{2\,\rho}$. On peut donc écrire $T_0 = Q_0 \frac{k}{2\,x}$. D'où l'on déduit, pour le rapport $\frac{T_0}{Q_0}$ que M. Jacobi désigne par E, et auquel il donne le nom d'*effet économique*, l'expression $E = \frac{k}{2\,x}$.

Cette expression ne dépend que de la force électromotrice qui doit être la plus grande possible, et du coefficient x qui caractérise l'appareil.

Si l'on suppose que la surface totale de la pile σ est seule donnée, en désignant par n le nombre inconnu des couples, par λ la résistance de l'unité de surface de la pile, et par λ' la résistance totale du circuit moins la pile, la résistance totale sera :

$$\rho = \frac{n^2 \lambda}{\sigma} + \lambda';$$

$$T_0 = \frac{\sigma\, n^2 k^2}{4\,x\,(n^2\lambda + \lambda'\sigma)}.$$

Expression qui croît avec n et dont la limite est $\frac{\sigma\, k^2}{4\,x\,\lambda}$.

Cette valeur est le double de celle que l'on obtient pour T_0 dans le cas du maximum d'aimantation qui a lieu, comme on le sait, lorsque la résistance de la pile est égale à la résistance extérieure.

Nous terminons cette note par la communication de M. Soret

M. Jacobi s'est occupé seulement du cas ordinaire où le mouvement de la machine électro-magnétique s'effectue dans le sens naturel. Mais les formules devraient s'appliquer aussi bien au cas où l'on force la machine à prendre un mouvement en sens opposé, à l'aide d'une force mécanique extérieure. Il suffit de donner à la vitesse v une valeur négative. Dans ce cas, ce que M. Jacobi a appelé le contre-courant deviendrait négatif, c'est-à-dire de même sens que le courant principal. Le courant total serait donc plus fort pendant que la machine est animée d'une vitesse négative que lorsqu'elle est arrêtée.

Lorsque l'on donnerait à la machine une vitesse négative $\frac{\rho}{x\beta^2}$, d'après la formule $i = \frac{nk}{\rho - x\beta^2}$, le courant total prendrait une valeur infinie.

Or cette vitesse ne serait pas très-considérable, puisque c'est la valeur qui, en sens positif, correspond au maximum de travail et que M. Jacobi annonce avoir atteinte dans ses expériences. En même temps que l'intensité du courant deviendrait infinie, le travail mécanique qu'il faudrait employer pour donner à la machine cette vitesse négative deviendrait lui-même infini.

Enfin, en donnant à la machine une vitesse plus grande encore, le courant changerait de sens.

Or ces conséquences ne se réalisent pas par l'expérience. Loin d'augmenter l'énergie du courant en faisant marcher la machine en sens inverse, on en diminue l'intensité presque autant que si le mouvement était direct.

On pourrait concevoir que ces conséquences ne pussent pas se réaliser d'une manière absolue, tout en admettant l'exactitude générale des formules. Ainsi l'existence d'un maximum d'aimantation, certaines dispositions adoptées dans les machines électro-magnétiques empêcheraient une augmentation illimitée de l'intensité. Mais comme c'est une diminution considérable que l'on observe, il faut rechercher les éléments négligés dans le calcul. M. Marié Davy a indiqué deux de ces éléments (*Compte rendu de l'Académie des Sciences*, 1855) : c'est l'inertie électrique du conducteur lui-même et l'inertie provenant de l'induction du courant sur lui-même par l'effet de ses circonvolutions. Un troisième élément, beaucoup plus important que M. Marié Davy aura peut-être signalé dans son dernier Mémoire, dont le titre seul est mentionné dans les *Comptes rendus*, c'est que chaque fois que le circuit est fermé, les barreaux de fer doux en s'aimantant développent un contre-courant énergique qui diminue considérablement l'intensité totale. A la rupture du circuit il y a bien une augmentation d'intensité qui se manifeste par le plus grand éclat de l'étincelle, mais qui est loin de compenser la diminution précédente. Il y a donc une *inertie magnétique* qui joue un rôle très-important, comme le feront voir les trois expériences suivantes.

1° J'ai pris une petite machine électro-magnétique de Froment. J'ai

enlevé la roue qui supporte les armatures de fer doux dont l'attraction détermine le mouvement de la machine. L'arbre de cette roue qui porte le commutateur était laissé en place, et on pouvait le mettre en mouvement à l'aide d'un mécanisme.

En mettant une pile en communication avec la machine, et en laissant cette dernière au repos, la déviation du galvanomètre introduit dans le circuit était de 48°; en donnant à la machine une vitesse de 408 tours par minute, la déviation tombait à 30°; en augmentant encore la vitesse la déviation diminuait encore. Ainsi, sans que la machine produisît un travail mécanique, par le seul fait de l'inertie magnétique, il se développe un contre-courant très-énergique.

2° J'ai pris une hélice dans l'axe de laquelle on pouvait placer à volonté un barreau de fer doux. J'ai formé un circuit avec une pile et un interrupteur à mouvement d'horlogerie; une aiguille aimantée servait à mesurer l'intensité du courant. La déviation était notable, mais plus faible quand on plaçait le barreau de fer doux que lorsqu'on l'enlevait (19 à 20° dans le premier cas, 24° dans le second).

3° J'ai pris une machine électro-magnétique construite par Bonijol. Dans cette machine il n'y a qu'une paire d'électro-aimants qui s'aimantent et se désaimantent, de sorte que le courant est interrompu dans tout le circuit (ce qui n'a pas lieu dans la machine Froment, où le courant passe toujours dans l'un des électro-aimants). J'ai mis cet appareil en communication avec la pile en introduisant dans le circuit une hélice dont la résistance fût comparable à celle de la machine. En introduisant un barreau de fer doux dans l'axe de l'hélice, on observe que le mouvement de la machine est notablement ralenti, ce dont on peut s'assurer soit en comptant les tours, soit simplement à l'oreille.

Ces expériences indiquent clairement que l'aimantation que produit un courant discontinu diminue considérablement l'intensité de ce courant.

Pour donner une idée de l'influence qu'elle a dans une machine électro-magnétique, je citerai les chiffres suivants obtenus avec la machine de Froment.

Déviation, la machine étant au repos.	» 57°
Déviation, la machine faisant 248 révolutions par minute dans le sens naturel (vitesse positive).	» 30°
Déviation, la machine faisant 242 révolutions par minute en sens inverse (vitesse négative).	» 32°

Ainsi le courant est bien un peu plus énergique quand la machine se meut en sens inverse; mais on voit combien la différence est faible.

FIN DU TROISIÈME ET DERNIER VOLUME.

425,251

TABLE DES MATIÈRES

DU TROISIÈME ET DERNIER VOLUME.

Pages

AVERTISSEMENT. v

SIXIÈME PARTIE.

RAPPORTS DE L'ÉLECTRICITÉ AVEC LES PHÉNOMÈNES NATURELS.

CHAPITRE I. — **Production d'électricité dans les actions physiologiques.** 1

§ 1. Notions générales sur l'électricité physiologique et particulièrement sur l'électricité animale. . . . . *id.*

§ 2. Du courant propre de la grenouille et du courant musculaire en général. 7

§ 3. Théorie du courant musculaire; influence sur l'intensité de ce courant de diverses causes et en particulier de la contraction. — Contraction induite, soit secondaire. 23

§ 4. Du courant nerveux. 41

§ 5. Rapprochement entre le courant musculaire et le courant nerveux et conséquences physiologiques. 49

§ 6. Poissons électriques. 61

§ 7. Production d'électricité dans les végétaux. 82

CHAPITRE II. — **Électricité atmosphérique.** 89

§ 1. Existence de l'électricité atmosphérique et moyen de la constater. . . . . *id.*

§ 2. Étude de l'électricité de l'atmosphère à l'état normal. . . . 98

§ 3. Des orages et des phénomènes électriques qui les accompagnent. 113

§ 4. De la chute de la foudre, des phénomènes qui l'accompagnent, des moyens de s'en préserver. — Paratonnerres. . . . 137

Pages

§ 5. Du rôle de l'électricité atmosphérique dans les phénomènes météorologiques. 165
§ 6. Origine de l'électricité atmosphérique. 188

CHAPITRE III. — **Magnétisme terrestre**. 200

§ 1. Description et théorie des instruments. . . . . *id.*
§ 2. Résultats des observations relatives à la détermination des éléments du magnétisme terrestre et de leurs variations. . 219
§ 3. Hypothèses sur les causes des phénomènes du magnétisme terrestre 263
4. Phénomènes naturels liés avec le magnétisme terrestre. — Aurores boréales. 280

SEPTIÈME PARTIE.

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I. — **Applications physiques**. 308

§ 1. Application de l'électricité à la production de la lumière et de la chaleur. . . . . *id.*
§ 2. Application des propriétés magnétiques du courant à la production d'un moteur mécanique. 322
§ 3. Application à la télégraphie. 344

A. Télégraphes à aiguilles. 351
B. Télégraphes à cadran. 370
C. Télégraphes enregistreurs. 390
D. Télégraphes magneto-électriques. 417
E. Conducteurs employés dans les lignes télégraphiques. — Transmission simultanée de deux dépêches par un seul conducteur en sens contraires. 421
F. Emploi de la télégraphie électrique dans les observations scientifiques et plus particulièrement astronomiques. 448

§ 4. Application de l'électro-magnétisme à divers appareils . . . 455

Horloges électriques. . . . . *id.*
Chronoscopes. 464
Sonneries électriques. 466
Tissage électrique. 467
Appareil pour entretenir le mouvement du pendule Foucault. . . . 475
Appareil électro-trieur. 478
Application de l'électro-magnétisme à l'adhérence des locomotives sur les rails, à la transmission du mouvement et à l'éclairage des convois. 481
Enregistreurs électriques. 484

Pages.

CHAPITRE II. — **Applications chimiques.** 492

§ 1. Considérations générales sur les forces électro-chimiques et leurs applications. 493
§ 2. Application à la préparation des corps simples. 510
§ 3. Application à la formation de dépôts métalliques en couches minces. — Dorure, argenture, etc. 524
§ 4. Application à la galvanoplastie. 544

CHAPITRE III. — **Applications physiologiques, soit thérapeutiques.** 564

§ 1. Coup d'œil général sur l'application de l'électricité à l'art de guérir et description des appareils employés. . . . . *id.*
§ 2. Analyse des effets thérapeutiques directs de l'électricité. . . 588
§ 3. Examen des cas particuliers auxquels la thérapeutique électrique est applicable. 611
§ 4. Effets thérapeutiques indirects de l'électricité. 655
§ 5. Effets physiologiques de l'électricité atmosphérique. . . . 670

APPENDICE.

§ 1. Recherches récentes sur l'induction électrostatique. . . . 681
§ 2. Influence des actions mécaniques sur l'aimantation. . . . 687
§ 3. Influence de la température sur le magnétisme. 692
§ 4. Théorie de l'induction électro-dynamique de M. Felici. . . 695
§ 5. Perfectionnements apportés aux appareils d'induction. . . 698
§ 6. Nouvelles recherches sur la polarité diamagnétique et sur le diamagnétisme en général. 704
§ 7. Propriétés optiques des corps transparents soumis à l'action du magnétisme. 715
§ 8. Réduction en unités mécaniques des mesures d'intensité des courants par MM. Weber et Kohlraulsch. 719
§ 9. Recherches relatives sur la conductibilité. 722
§ 10. Nouvelles expériences pour prouver que la transmission de l'électricité à travers les liquides est toujours accompagnée de leur décomposition électrolytique. 728
§ 11. Phénomènes de transport dans l'électrolyse. 733
§ 12. Recherches sur la force électromotrice. 740
§ 13. Transformation de la chaleur électrique en travail mécanique. 746
§ 14. Recherches relatives aux poissons électriques. 752

Pages

§ 15. Nouvelles recherches sur les variations des éléments magnétiques du globe terrestre. 754

§ 16. Procédé de M. Wartmann pour établir une correspondance immédiate entre deux quelconques des stations situées sur une même ligne télégraphique. 757

NOTES

RELATIVES AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS.

NOTE A. Relative à la mesure absolue de l'intensité du magnétisme terrestre. 759

NOTE B. Relative au magnétomètre bifilaire. 772

NOTE C. Relative à la détermination des éléments magnétiques des principales stations du globe terrestre. 775

NOTE D. Relative aux électromoteurs. 780

FIN DE LA TABLE DU TROISIÈME ET DERNIER VOLUME.

Paris. Imprimerie de P.-A. BOURDIER et Cie, rue Mazarine, 30.

Digitized by Google

Digitized by Google

425251

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google